DEUTSCHES MUSEUM

ABHANDLUNGEN UND BERICHTE

JAHRGANG [illegible]

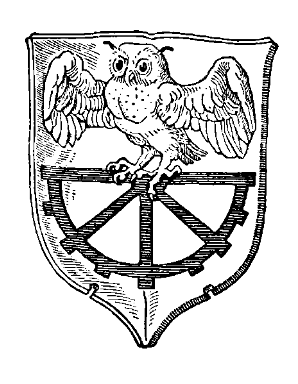



Stadt-
Bibliothek
Elbing



DEUTSCHES MUSEUM
ABHANDLUNGEN UND BERICHTE

9. JAHRGANG / 1937



MIT 82 ABBILDUNGEN
UND EINEM BILDNIS

1 9 3 7

VDI-VERLAG GMBH / BERLIN NW 7

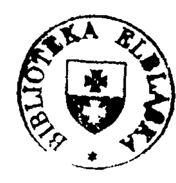
HERAUSGEGEE N IM AUFTRAGE DES DEUTSCHEN MUSEUMS VON:
Geh. Reg.-Rat rof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. E. h. J. ZENNECK VDI, München
Prof. Dr. phil. h. c. Dr.-ing. E. h. C. MATSCHOSS VDI, Direktor des Vereines deutscher Ingenieure, Berlin

chriften sind zu richten an die Abteilung für Technikgeschichte s VDI, Berlin NW 7, Ingenieurhaus

---

DEUTSCHES MUSEUM
Einteilung, Besuchszeiten und Eintrittspreise

Erdgeschoß Ost (Montag geschlossen)	Geologie, Berg- und Hüttenwesen, Metallbearbeitung, Kraftmaschinen
Erdgeschoß West (Dienstag geschlossen)	Landverkehrsmittel, Straßen-, Eisenbahn-, Tunnel- und Brückenbau, Schiffbau, Flugtechnik, Meteorologie
1. Obergeschoß (Donnerstag geschl.)	Zeitmessung, Mathematik, Mechanik, Wärmelehre, Elektrizität, Telegraphie, Telephonie, Optik, Fernsehen, Akustik, Musikinstrumente, Chemie, Nahrungsmittel und Pharmazie
2. Obergeschoß (Freitag geschlossen)	Bauwesen, Beleuchtung, Heizung, Wasserversorgung, Bäder, Gastechnik und Elektrotechnik
3. Obergeschoß (Samstag geschlossen)	Astronomie, Geodäsie, Textilindustrie, Papierherstellung, Reproduktionstechnik, Landwirtschaft, Brauerei, Brennerei
Bibliothek	Lesesäle, Bücherschau, Nachschlageabteilung, Urkundensammlung, Patentschriften




Besuchszeiten:

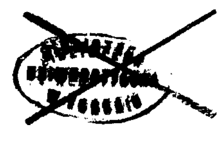
Sammlungen	Täglich 9 bis 18 Uhr
Bibliothek	Werktags 9 bis 21 Uhr, Sonntags 9 bis 18 Uhr

Eintrittspreise:

Sammlungen	Erwachsene RM 1,—, Sonntags 50 Pf., Jugendliche 25 Pf.
Bibliothek	Erwachsene 30 Pf., Jugendliche 15 Pf.

Führungen werden jederzeit durch die Kasse vermittelt
Restauration und Buchhandlung im Hause
Straßenbahn 1, 2, 9, 11, 19, 30 — Fernsprecher: 22856





Inhaltverzeichnis

Printed in Germany

Druck: Triasdruck GmbH, Berlin SW 19

Vom Flohglas zum Elektronenmikroskop

Von *Kurt Michel*, Jena *)

Wann zum erstenmal die vergrößernde Kraft einer Linse oder eines linsenähnlichen Körpers bewußt dazu benutzt wurde, tiefer in die wegen ihrer Kleinheit dem Menschenauge verborgenen Geheimnisse der Natur einzudringen, ist heute mit Sicherheit nicht mehr festzustellen.

Mit diesem Augenblick jedenfalls beginnt die Entwicklung desjenigen optischen Instruments, dem die Menschheit so viel zu verdanken hat, wie keinem zweiten seiner Art, des Mikroskops. Eine ganz neue Welt eröffnete sich dem forschenden Menschengeist, eine Welt, von der bis dahin niemand auch nur das Geringste hatte ahnen können. Erst das Mikroskop machte die Entwicklung der neuzeitlichen Naturwissenschaften bis zu ihrer heutigen Größe möglich, insbesondere natürlich die der biologischen und der medizinischen Richtung. Denn wo wären die Leistungen eines *Robert Koch*, eines *Pasteur* und vieler anderer stiller Kämpfer gegen die unsichtbaren Feinde der Menschheit ohne das Mikroskop! Und wo blieben unsere Kenntnisse über den feineren Aufbau der organischen und anorganischen Welt ohne leistungsfähige Mikroskope!

Aber über der Achtung vor den Leistungen derer, denen das Mikroskop ein unentbehrliches Werkzeug bei ihrer Arbeit war und ist, sollte man auch den ungeheuren Fleiß und die unendliche Mühe der Männer nicht vergessen, die Mikroskope bauten. In unermüdlicher Arbeit haben sie das Gerät durch drei Jahrhunderte so weit vervollkommnet, daß es heute hinsichtlich seiner optischen Leistungsfähigkeit die Grenze des Möglichen erreicht hat. Ihre Steigerung erscheint mit den praktisch zur Verfügung stehenden Mitteln zur Zeit ausgeschlossen.

Das erste echte, d. h. zusammengesetzte Mikroskop ist etwa um die Wende des sechzehnten zum siebzehnten Jahrhundert gebaut worden. Das Jahr seiner Erfindung aus den uns überlieferten Urkunden genau zu ermitteln, gelingt allerdings nicht mehr. Ebensowenig kann man mit Sicherheit seinen Erfinder namhaft machen. Heute gelten nach den eingehenden Untersuchungen von *Harting* allgemein die beiden Brillenschleifer *Johannes* und *Zacharias Jannssen* aus Middelburg in Holland als diejenigen, denen der Ruhm dieser Erfindung gebührt.

Allgemeiner bekannt und in Gebrauch genommen wurde das zusammengesetzte Mikroskop jedoch erst Jahrzehnte später, nämlich in

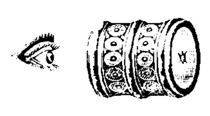
---

*) Der Verfasser ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der optischen Werke von C. Zeiss.

der zweiten Hälfte des siebzehnten und im achtzehnten Jahrhundert. Das kam wohl daher, daß dieses Gerät recht wenig leistete. Es ließen sich nur schwache Vergrößerungen mit ihm erzielen. Infolgedessen bevorzugten alle, die sich ernsthaft mikroskopischen Studien hingaben, nach wie vor einfache Mikroskope. Das war gerade dort, wo sich die Anwendung stärkerer Vergrößerungen notwendig machte, bis weit ins achtzehnte Jahrhundert hinein der Fall. Es ist deshalb unerläßlich, einen Blick auch auf den Werdegang des einfachen Mikroskops, das wir heute gewöhnlich als Lupe bezeichnen, zu werfen, bevor wir uns der Entwicklung des zusammengesetzten Mikroskops zuwenden.

Die Fähigkeit kugeliger Körper aus durchsichtigen Stoffen, einen Gegenstand dem Auge vergrößert zu zeigen, ist dem Menschen wohl nicht lange unbekannt geblieben. Die Beobachtung dieser Tatsache wird uns mehrfach auch schon aus dem Altertum überliefert. Die erste bekannt gewordene wissenschaftliche Abhandlung über optische Fragen stammt indes aus späterer Zeit. Ihr Verfasser ist der Araber *Alhazen, Ibn al Haitam* (um 1000 n. Chr.). Auch von dem Philosophen *Roger Bacon* kennen wir ein Werk, in dem er sich eingehend mit den zu seiner Zeit bekannten Tatsachen aus der Optik beschäftigt (um 1267 n. Chr.). Genauere Nachrichten über Linsen für mikroskopische Zwecke sind allerdings erst vom Ende des sechzehnten Jahrhunderts an erhalten. Wie die Instrumente aussahen, mit denen um diese Zeit Männer wie *Georg Hufnagel* (1592), *Franziskus Stellutus* (1625) oder *Thomas Moufetus* (1634) ihre Untersuchungen an Insekten und anderem kleinen Getier anstellten, wissen wir nicht. In ihren uns überkommenen Werken finden sich keine Abbildungen ihres Handwerkszeugs. Jedenfalls aber konnten sie mit den ihnen zur Verfügung stehenden optischen Hilfsmitteln stärkere Vergrößerungen nicht erzielen. Darauf deutet schon die Art der untersuchten Gegenstände hin. Soweit es nicht einfache, ungefaßte Linsen waren, gehörten ihre Mikroskope wahrscheinlich ebenso wie die von dem gelehrten Jesuitenpater *Athanasius Kircher* (1646) benutzten, zu den damals schon verhältnismäßig weit verbreiteten „Flohgläsern". Ein solches „vitrum pulicarium" oder auch „vitrum muscarium", Abb. 1a, bestand aus einem kurzen Rohr, in dessen eines Ende eine einfache Linse gefaßt war. Der zu untersuchende Gegenstand wurde auf einem am anderen Ende angebrachten Glasplättchen befestigt. Einen etwas abweichenden Typ, den *Kircher* gleichfalls benutzte, beschreibt schon *Descartes.* Bei dessen Mikroskop, Abb. 1b, wurde das Objekt an einer Art Stachel befestigt. Außerdem war ein Hohlspiegel zur Beleuchtung vorgesehen. Die gleichen oder nur in unwesentlichen Einzelheiten abweichenden Geräte werden von manch anderem Mikroskopiker jener Zeiten gleichfalls erwähnt.

Ihnen ähnlich sind auch die Mikroskope des Mannes, den man als den eigentlichen Begründer der wissenschaftlichen Mikroskopie anzusehen hat, *Antoni van Leeuwenhoeks* (1632 bis 1723). *Leeuwenhoek* fertigte sich alle seine Mikroskope mit eigener Hand an, von den Linsen angefangen bis zu den mechanischen Teilen. Die letzteren waren ja verhältnismäßig primitiv. Um so leistungsfähiger müssen aber seine selbstgeschliffenen Linsen gewesen sein, wenn man aus seinen Beobachtungen darauf Rückschlüsse ziehen darf. Was hat er aber nicht auch alles unter seine Mikroskope genommen und mit ihnen



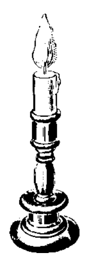


Abb. 1a. Vitrum pulicare commune nach Zahn (1685).

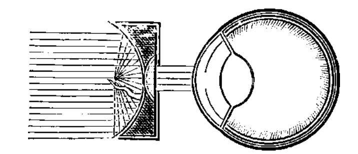


Abb. 1b. Einfaches Mikroskop des Descartes mit Hohlspiegel zur Beleuchtung des Objekts (1637).

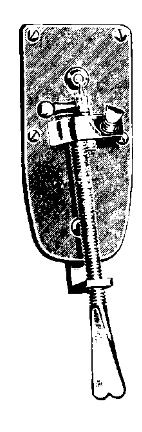
zum ersten Male erblickt! In diesem Zusammenhang sei hier nur erwähnt, daß er es war, der zum ersten Male Bakterien sah. Dies allein beweist schon, daß seine Linsen wesentlich besser waren, als alle bis dahin benutzten. Seine Sammlung soll Mikroskope enthalten haben, die 133-, 160-, ja sogar 270fach vergrößerten. Für jede seiner Untersuchungen muß er sich ein besonderes Instrument verfertigt haben, so daß aus seinem Nachlaß 247 vollständige Mikroskope und 172 gefaßte Linsen öffentlich versteigert werden konnten. 26 Mikroskope hatte er außerdem vorher testamentarisch der Royal Society in London vermacht, die ihn wegen seiner damals schon als bahnbrechend anerkannten Untersuchungen zu ihrem Mitglied ernannt hatte und mit der er in ständigem Briefwechsel stand.

Die Leeuwenhoekschen Mikroskope sind alle nach etwa der gleichen Art gebaut, Abb. 2.

Die Linse ist zwischen zwei Platten gefaßt, die in den meisten Fällen aus Silber, zuweilen aus Gold oder auch aus Messing bestehen. Das

Objekt wurde an einem Dorn befestigt. Wie das geschah, ist nicht mehr ganz klar. Zwei den Dorn bewegende Schrauben dienten zur feineren Einstellung.

Neben dieser Bauart, der weitaus die meisten seiner Mikroskope zugehören, hatte *Leeuwenhoek* noch Sonderausführungen für gewisse Untersuchungen, so z. B. für die Beobachtung der Blutbewegung in der Schwanzflosse des Aales. Die Demonstration dieser Erscheinung war sein Paradestück, das er keinem der vielen Besucher vorenthielt, die ihn in seinen späteren Lebensjahren, als er bereits eine europäische Berühmtheit geworden war, in großer Zahl aufsuchten.



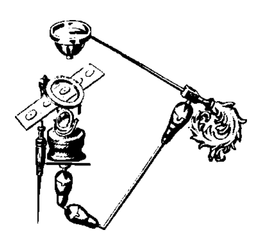


Abb. 3. Mikroskop nach Musschenbroek.

Abb. 2 (links). Ein einfaches Mikroskop von Leeuwenhoek (um 1670).

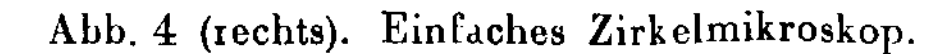
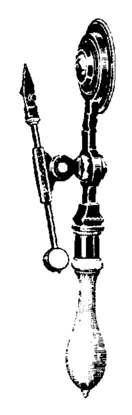


Abb. 4 (rechts). Einfaches Zirkelmikroskop.



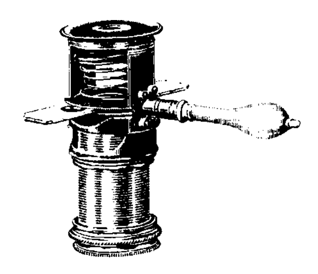
Leeuwenhoek blieb natürlich nicht allein in dem Bestreben, die dem bloßen Auge nicht erkennbaren Geheimnisse der Natur mit Hilfe des Mikroskops zu entschleiern. Schon zu seinen Lebzeiten wurde dieses Gerät mehr und mehr auch von anderen zu Untersuchungen aller Art benutzt. Zum nicht geringen Teil ist das wohl gerade auf seine Arbeiten und das durch sie geweckte Interesse an der mikroskopischen Lebewelt zurückzuführen. Weit verbreitet waren für derartige Beschäftigungen zunächst immer noch einfache Geräte von der Art der „Flohgläser". Sie dienten allerdings wohl schon immer mehr dem Vergnügen, als der ernsthaften Forschung. Finden sich doch für diesen Zweck bald Formen, die vor allem in ihrer mechanischen Ausstattung die Flohgläser und auch die Mikroskope Leeuwenhoeks wesentlich übertreffen. Auch in der optischen Einrichtung weisen sie schon gewisse Verbesserungen auf. Während *Leeuwenhoek,* wie erwähnt, für jede Untersuchung ein besonderes Instrument benutzte, wurden viele der nach ihm angefertigten Mikroskope mit einem Satz von Linsen von verschiedener Vergrößerung ausgerüstet. Zu ihnen gehören in erster Linie die Mikroskope des *Johannes* und *Samuel van Musschenbroek* aus Leyden, Abb. 3. An

ihnen sind besonders bemerkenswert die infolge der Einführung von Kugelgelenken, der sogenannten Musschenbroekschen Nüsse, sehr frei beweglichen Objekthalter, die auch in dem das Objekt aufnehmenden Teil sehr gut durchgebildet waren. An einem der Musschenbroeckschen Mikroskope finden sich sogar erstmalig Blenden zur Regelung der Beleuchtung. Eine Vorrichtung zur feinen Einstellung ließen sie jedoch vermissen. Eine solche findet sich wieder an einigen Mikroskopen, die aus der Hand des Augsburgers *Cosmus Konradus Cuno* hervorgingen. Sie schlossen sich teils an die Leeuwenhoeksche, teils an die Musschenbroeksche Bauart an. Auch von anderer Seite wurden ähnliche Geräte gebaut. Zu dem Leeuwenhoekschen Muster gehört unter anderem das anatomische Mikroskop Lieberkühns. Aus dem Musschenbroekschen dagegen leiten sich die sogenannten Zirkelmikroskope, Abb. 4, ab, die sich längere Zeit großer Beliebtheit erfreuten. Wie der Name sagt, waren sie wie ein Zirkel gebaut. Auf dem einen Schenkel hatte die Linse ihren Platz, am Ende des anderen konnte das Objekt befestigt werden. Solche Zirkelmikroskope wurden in den verschiedenartigsten einfachen und komplizierten Ausführungsformen benutzt. Es gab solche mit und ohne Feineinstellung, mit und ohne Fuß und mit und ohne Beleuchtungseinrichtung für das Objekt. Für durchfallendes Licht bestand diese meistens aus einer Linse, manchmal auch nur aus einem Planspiegel. Für auffallendes Licht benutzte *Lieberkühn* z. B. kleine silberne Hohlspiegel, in deren Mittelpunkt die Linse in einem kleinen Loch angebracht war. Derartige Spiegel führen heute noch den Namen „Lieberkühn-Spiegel", allerdings zu Unrecht, denn schon *Leeuwenhoek* hat sie benutzt, und zum erstenmal beschrieben wurden sie gar schon von *Descartes* (vgl. hierzu Abb. 1 b).

Ein in seinen mechanischen Teilen wesentlich anders aufgebautes Mikroskop hat dann gegen Ende des siebzehnten Jahrhunderts *Hartsoeker* bekanntgemacht. Sein Gerät schließt sich mit seiner Röhrenform und in der Handhabung bei der Beobachtung eng an die Flohgläser an, war aber diesen gegenüber dadurch wesentlich verbessert, daß die Linsen ausgewechselt werden konnten, daß viel stärkere Vergrößerungen mit ihnen zu erzielen waren und daß eine Feineinstellung sowie eine Beleuchtungslinse vorgesehen war. Die stärksten Linsen des *Hartsoeker* sollen eine über 1000-fache Vergrößerung gehabt haben. Wahrscheinlich waren das aber gar keine geschliffenen Linsen mehr, sondern geschmolzene Glaskügelchen, die man seinerzeit sehr viel für einfache Mikroskope mit starken Vergrößerungen benutzte. Ihre Herstellung geschah auf die verschiedenste Weise. Fast jeder, der sich damit abgab, hatte sein eigenes Verfahren.

Wilson, der in der ersten Hälfte des achtzehnten Jahrhunderts die Hartsoekerschen Mikroskope vielfach nachbaute, Abb. 5, verbesserte sie nicht wesentlich.

Ein Stativ dagegen, das er für seine Mikroskope zur bequemeren Haltung bei der Arbeit konstruierte, kann als beachtenswerter Fortschritt gewertet werden. Auch *Joblots* recht genau gearbeitete und kunstreich verzierte, zur gleichen Zeit entstandenen Mikroskope tragen so viel wie nichts zu einer wirklichen Weiterentwicklung des Gerätes bei.



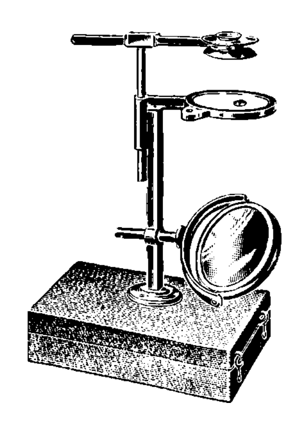


Abb. 5. Wilsonsches Mikroskop zur freihändigen Benutzung.

Abb. 6. Einfaches Mikroskop nach Cuff (1750).

Die meisten der erwähnten Mikroskope mußten zur Beobachtung frei in der Hand gegen das Licht gehalten werden. Wo etwas wie ein „Stativ" vorhanden war, wie etwa bei dem anatomischen Mikroskop von *Lieberkühn*, bei manchen Zirkelmikroskopen, oder bei dem erwähnten Mikroskop von *Wilson*, erfüllte es bei weitem nicht die Anforderungen, die hinsichtlich leichter Handhabung, zweckmäßiger Anordnung der Einzelteile und Festigkeit gestellt werden mußten. Das änderte sich erst, als das zusammengesetzte Mikroskop seine Kinderkrankheiten überwunden hatte und die Entwicklung des einfachen Mikroskops zu beeinflussen imstande war.

Dem englischen Optiker *Cuff* gelang es um die Mitte des achtzehnten Jahrhunderts, den für das einfache Mikroskop zweckmäßigsten Stativaufbau nach dem Vorbild des zusammengesetzten Mikroskops zu schaffen. Dieser hat sich denn auch in seinen Grundelementen bis fast auf den heutigen Tag erhalten. Die wesentlichen Teile eines solchen Stativs, Abb. 6, sind eine Säule mit einem fest mit ihr verbundenen Tisch für das Objekt, ein in der Höhe verstellbarer Halter für die Linse und ein am unteren Teil der Säule beweglich angebrachter Beleuchtungsspiegel. Als Fuß wurde das Aufbewahrungskästchen benutzt. Die Höhenverstellung der Linse mußte durch Verschieben eines Stabes in einer Hülse bewerkstelligt werden. Das war noch recht unzweckmäßig, zumal ja gerade mit dem einfachen Mikroskop zu jener Zeit Unter-

suchungen mit stark vergrößernden Linsen vorgenommen wurden. Dieser Mangel wurde aber bald beseitigt, sowohl von *Cuff* selbst, als auch von denen, die das Cuffsche Modell alsbald nachbauten. Das war in der zweiten Hälfte des achtzehnten Jahrhunderts in ausgedehntestem Maße der Fall, so daß diese Art der einfachen Mikroskope rasch alle anderen zahlenmäßig übertraf.

Nachdem wir nunmehr den Entwicklungsgang der einfachen Mikroskope zunächst bis an die Schwelle des neunzehnten Jahrhunderts verfolgt haben, ist es an der Zeit, uns zum zusammengesetzten Mikroskop zurückzuwenden. Die ersten Instrumente dieser Art aus der Werkstatt der *Janssen* selbst sind uns nicht mehr bekannt. Trotzdem können wir uns ein recht gutes Bild von ihnen machen, denn eins von ihnen ist von einem belgischen Gesandten *Wilhelm Borel* in einem Brief an den Leibarzt Ludwigs des XIV., *Petrus Borellus,* beschrieben worden. Danach ist es durchaus nicht etwa primitv gewesen. Der Tubus aus vergoldetem Messing wurde von drei Delphinen, also von einer Art Dreifußgestell getragen. Das Ganze stand auf einer Fußplatte aus Ebenholz, die gleichzeitig als Objekttisch diente. Die optische Ausrüstung bestand nur aus zwei Linsen, einer Objektivlinse und einer Okularlinse. Durch Verändern des Abstandes zwischen beiden konnte man die allerdings nur geringe Vergrößerung verändern.

Alle diesem Janssenschen Gerät bald zahlreich nachgebauten Mikroskope unterschieden sich zunächst kaum von ihrem Vorbild. Kleinere und größere Verbesserungen wurden natürlich mit der Zeit eingeführt. *Divini* verwandte z. B. Okulare, die aus zwei plankonvexen Linsen zusammengesetzt waren, und das bekannte Mikroskop *Robert Hookes*, Abb. 7, zeichnete sich durch beachtliche Neuerungen am Stativ aus. Es besaß eine Einrichtung zum Einstellen mittels Gewinde und zum Neigen des Tubus. Dieser enthielt außer der Objektiv- und Okularlinse noch eine dritte Linse zwischen beiden, die in der Wirkung wohl unseren heutigen Kollektivlinsen entsprochen haben mag. Wie alle zusammengesetzten Mikroskope jener Zeit war es nur für auf-

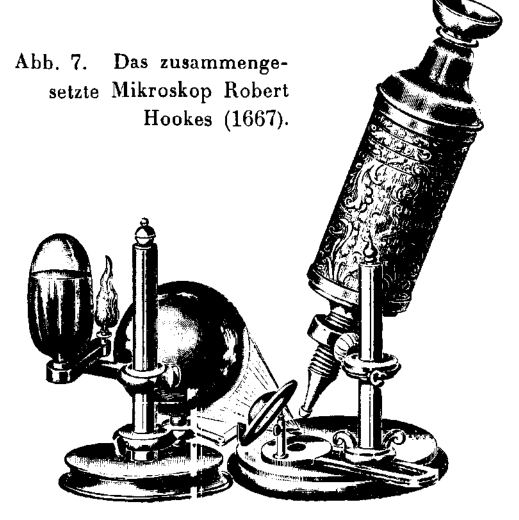


Abb. 7. Das zusammengesetzte Mikroskop Robert Hookes (1667).

fallendes Licht eingerichtet. *Hooke* verwandte auch schon eine ganz sinnreiche Einrichtung, um die Objekte auf seinem Mikroskop künstlich ausreichend beleuchten zu können, eine Schusterkugel und eine Linse, mit deren Hilfe er das Licht einer Öllampe auf das Objekt warf. Bei Tages- oder Sonnenlicht benutzte er, um die Helligkeit zu steigern, gleichfalls die Schusterkugel oder eine Linse.

Die übrigen aus der zweiten Hälfte des siebzehnten Jahrhunderts in großer Zahl bekannten zusammengesetzten Mikroskope folgen in ihrer Form und in ihrem optischen Aufbau bald mehr den Hookeschen, bald mehr den Janssenschen Stativen. Unter ihnen verdient nur das berühmte Mikroskop des *Johann Franz Grindl von Ach* besonderer Erwähnung. Dieser Konstrukteur verallgemeinerte nämlich das Verfahren Divinis, statt einer einfachen Linse ein System aus zwei mit den gekrümmten Flächen gegeneinander gekehrten Plankonvexlinsen zu verwenden, indem er nicht nur das Okular, sondern auch Objektiv und Zwischenlinse aus solchen Linsensystemen aufbaute. Objektive allein aus miteinander zusammengesetzten Linsen hat vor *Grindl* allerdings schon *Sturm* benutzt. Der allgemeinen Verbreitung dieser Verbesserung standen jedoch die damals bei so vielen Linsen noch nicht von jedem Mikroskopverfertiger zu überwindenden Zentrierschwierigkeiten entgegen.

Mit einigen Worten muß hier auch *Johannes Zahns*, des Kanonikus des Prämonstratenser-Ordens zu Würzburg, gedacht werden, nicht so sehr deshalb, weil er in seinem Werk „Oculus artificialis" eine große Zahl eigener und fremder Mikroskope eingehend beschrieben hat, sondern vielmehr, weil er in diesem schönen Buch eine Zusammenfassung alles dessen gibt, was man zu seiner Zeit gegen Ende des siebzehnten Jahrhunderts über die praktische und theoretische Seite des Mikroskopbaues wußte.

Wie schon erwähnt, kam man beim zusammengesetzten Mikroskop recht lange über verhältnismäßig schwache Vergrößerungen nicht hinaus. Einer der Hauptgründe dafür mag wohl gewesen sein, daß man diese Geräte anfangs ausschließlich für Untersuchungen mit auffallendem Licht benutzte. Daß zunächst niemand auf den Gedanken kam, auch durchfallendes Licht zu verwenden, ist um so erstaunlicher, als man doch, wie wir wissen, diese Art der Beleuchtung beim einfachen Mikroskop schon seit dessen Anfängen kannte. Erst zu Zahns Zeiten beginnen sich auch in dieser Hinsicht die ersten Fortschritte bemerkbar zu machen.

Tortona trat 1685 erstmals mit einem für Beobachtungen im durchfallenden Licht bestimmten kleinen zusammengesetzten Mikroskop hervor, welches in seinem Äußeren sehr den Hartsoeker- und Wilsonschen einfachen Mikroskopen ähnelte. Wie diese mußte es freihändig gegen

die Lichtquelle gehalten werden, und wie diese wurde es auch bald von vielen Mikroskoperbauern nachgeahmt. Hatte man doch rasch die Fruchtbarkeit erkannt, die in dem Gedanken lag, durchfallendes Licht zu benutzen. Bedeutende Verbesserungen verdankt das Instrument insbesondere dem Jesuitenpater *Bonanni.* Seinen schon ganz neuzeitlich anmutenden Ansprüchen genügten die Mikroskope nach *Tortona,* von denen er sich zwei verschiedene Ausführungen gebaut hatte, bald nicht mehr. Deshalb baute er sich ein drittes, großes Instrument, Abb. 8. Dieses ähnelt in geradezu überraschender Weise mikroskopischen Geräten, wie sie vielfach noch heutzutage in Gebrauch sind. Die optische Achse des Mikroskops lag waagerecht. Der Tubus hatte eine grobe Ein-

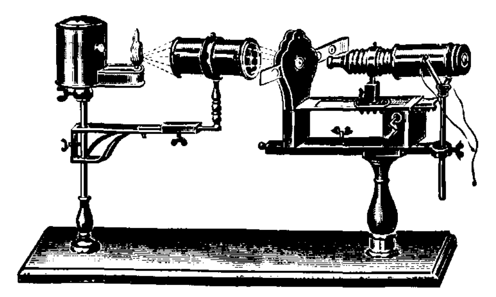


Abb. 8. Großes Mikroskop von Bonanni (1691).

stellung durch Zahn und Trieb und eine feine, durch ein am unteren Tubusende angebrachtes Gewinde. Eine gleichmäßige und gleichbleibende Beleuchtung wurde durch eine künstliche Lichtquelle, eine Öllampe, erzielt, deren Flamme durch ein aus zwei Linsen bestehendes Kondensorsystem in die Objektebene abgebildet wurde.

Um die gleiche Zeit versuchte man sich auch, angeregt durch erfolgreiche Versuche beim Fernrohr, in dem Bau von binokularen Mikroskopen. *Cherubin d'Orléans* gilt als der erste Verfertiger eines solchen Geräts, Abb. 9. Es war aus zwei nebeneinanderliegenden und unter einem gewissen Winkel zueinander geneigten Mikroskopen der damals üblichen Art zusammengesetzt. Die Objektive waren Einzellinsen, deren aneinanderstoßende Ränder gerade abgeschliffen waren. Die Okulare bestanden aus zwei Linsen. Der Erfinder hielt seine Bauart für sehr wertvoll und zukunftsreich. Viele der zeitgenössischen Mikroskopiker waren allerdings anderer Ansicht. Sie erwähnen die, natürlich auch von anderen Verfertigern gebauten, binokularen Mikroskope mehr als eine Merkwürdigkeit. Es zeigte sich auch bald, daß die Zweifler recht behielten, denn die Hoffnungen, die in das zweiäugige Mikroskop gesetzt wurden, erfüllten sich nicht. Schon um die Mitte des achtzehnten Jahrhunderts war es fast ganz von der Bildfläche verschwunden. Erst über

hundert Jahre später konnte es, wie wir nachher noch sehen werden, seine Auferstehung feiern.

Die Einrichtung des zusammengesetzten Mikroskops für durchfallendes Licht, die wir als letzte wesentliche Neuerung kennen lernten, verdrängte die für auffallendes Licht bestimmten Mikroskope nicht. Beide Beleuchtungsarten wurden vielmehr nebeneinander gleich häufig

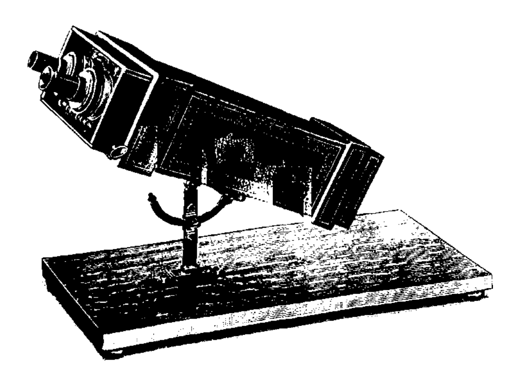


Abb. 9. Binokulares Mikroskop nach Cherubin d'Orléans. (Anfang des 18. Jahrhunderts).

angewandt, wobei die Mikroskopiker in der Regel je ein besonderes Stativ für durchfallendes und eins für auffallendes Licht benutzten.

Bald wurden indessen Versuche gemacht, die Verwendung der verschiedenen Beleuchtungsarten an einem und demselben Stativ zu ermöglichen. *Joblot,* aus dessen Händen, neben einfachen auch zusammengesetzte Mikroskope in großer Zahl hervorgingen, traf bei diesen als erster verhältnismäßig brauchbare Vorkehrungen zu dem genannten Zweck. Er durchbohrte nämlich die Fußplatte seiner Mikroskope und brachte in der Bohrung einen Blendenapparat an. Man hatte so die Möglichkeit, im durchfallenden Licht zu arbeiten, wenn man das ganze Stativ umlegte oder auf eine andere Art Licht durch den Fuß fallen ließ. Auffallendes Licht konnte in der damals üblichen Weise bei aufrechtstehenden Mikroskopen angewandt werden. Nebenbei sei bemerkt, daß *Joblot* auch sogenannte Universalmikroskope baute. Sie waren so eingerichtet, daß man einfache und zusammengesetzte Mikroskope am gleichen Stativ benutzen konnte. Die meisten Stative *Joblots* sind handlicher als die seiner Vorgänger. Sie zeichnen sich äußerlich durch besonders sorgfältige, saubere Arbeit und durch kunstreiche Verzierungen aus, genau wie seine einfachen Mikroskope.

In England und auch in Deutschland finden wir zur gleichen Zeit Erbauer von Mikroskopen, die ihr Augenmerk nicht wie *Joblot* in Frankreich in der Hauptsache auf Äußerlichkeiten, sondern auf das Ersinnen wirklicher Verbesserungen richteten. Die besten Erfolge er-

zielten dabei der Londoner Optiker *John Marshall* und der Deutsche Professor *Christian Gottlieb Hertel.*

Bei dem Gerät *Marshalls*, Abb. 10, wurden der Tubus und der Objekttisch von einer langen Stativsäule getragen. Beide waren an der Säule verstellbar und konnten in jeder Stellung durch Klemmschrauben festgehalten werden. Die Feineinstellung des Tubus wurde entweder durch eine neben der Stativsäule angebrachte Schraube oder durch Gewinde am unteren Tubusende wie bei dem alten Hookeschen Mikroskop bewirkt. Die Stativsäule war durch ein kräftiges Kugelgelenk mit einem Fußkasten verbunden. Das Gerät konnte für durch- und auffallendes Licht benutzt werden. Für das durchfallende Licht war eine unter dem Objekttisch angebrachte Beleuchtungslinse vorgesehen. Später soll an die Stelle der Linse ein Spiegel, wohl nach dem Vorbild anderer Mikroskope getreten sein. Die wichtigste neue Errungenschaft an diesem Gerät war aber die Beigabe eines Satzes von sechs verschiedenen Objektivlinsen, die gegeneinander ausgewechselt werden konnten.

Infolge seiner großen Vorzüge war das Marshallsche Mikroskop zu seiner Zeit recht verbreitet. Nicht ganz so bekannt scheint das Hertelsche Mikroskop gewesen zu sein, obgleich es in seinem mechanischen Aufbau noch vollkommener war als das Marshallsche, es allerdings infolge des Fehlens der gegeneinander auswechselbaren Objektive in der optischen Leistung bei weitem nicht erreichte.

Der Tubus war an einer festen Säule neigbar angebracht. Besonders gut durchgearbeitet war der Objekttisch. Er konnte durch drei Schrauben gehoben oder gesenkt, um seine Achse gedreht und waagerecht von vorn nach hinten verschoben werden. Auf diese Weise war eine sehr feine Einstellung des Objekts möglich. Der gesamte Mechanismus für die erwähnten Bewegungen war im Fußkasten untergebracht. Der Objekttisch besaß für Beobachtungen im auffallenden Licht eine Ebenholz- und eine Elfenbeinscheibe für helle bzw. dunkle Objekte. Für Beobachtungen im durchfallenden Licht war eine Öffnung ausgespart, über die das auf einer Glasplatte liegende Objekt gebracht und mit Hilfe eines unter dem Tisch befestigten Spiegels von unten beleuchtet werden konnte.



Abb. 10. Zusammengesetztes Mikroskop von J. Marshall (1708).

Eine Verbindung der eben geschilderten neuen Errungenschaften eines *Marshall* und eines *Hertel* mit den ältesten Stativformen, den Dreibeinstativen, stellen die zu ihrer Zeit wegen ihrer Einfachheit und Billigkeit sehr beliebten und weit verbreiteten Stative nach *Culpeper*

und *Scarlet,* Abb. 11, dar. Sie wurden wie die Marshallschen mit einem Satz verschiedener Objektive ausgerüstet. Wie das Hertelsche Gerät besaßen sie zur Beleuchtung mit durchfallendem Licht einen Spiegel. Für auffallendes Licht war eine Beleuchtungslinse vorgesehen. Neu an den Stativen war, daß die Grobeinstellung durch Verschieben des eigentlichen Tubus in einer Messinghülse vorgenommen wurde. Allerdings besaßen sie zu ihrem Nachteil keine Feineinstellung. Neu war ferner an einer späteren Ausführungsform, daß sie ganz aus Messing

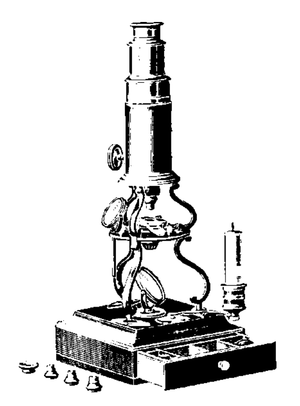


Abb. 11. Zusammengesetztes Mikroskop auf Dreibeinstativ nach Culpeper und Scarlet.

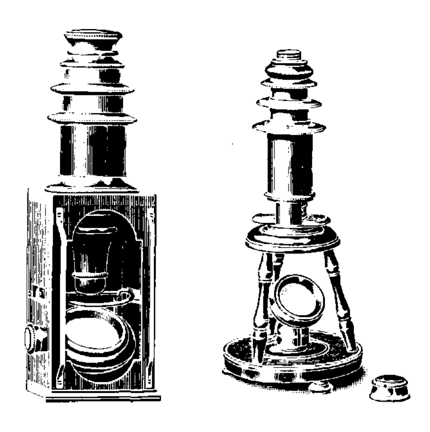


Abb. 12. Nürnberger Holzmikroskope.

bestanden, während vorher Holz, Horn und Pappe als hauptsächliche Baustoffe verwendet und Metalle nur für wenige Teile herangezogen wurden.

Holz und Pappe war auch der Baustoff der besonders wohlfeilen Mikroskope, die aus den Werkstätten Nürnberger Optiker um die Mitte des achtzehnten Jahrhunderts in großer Zahl in die Welt gingen, Abb. 12. Die hierher gehörigen Stative stellen jedoch nur unwesentlich geänderte Nachahmungen aller möglichen zu jener Zeit bekannten Muster dar, so daß es sich hier erübrigt, genauer auf sie einzugehen. Ihre Leistungsfähigkeit war auch, verglichen mit der anderer Mikroskope, verhältnismäßig gering.

Die Form der in der zweiten Hälfte des achtzehnten Jahrhunderts insbesondere von englischen Optikern in großer Zahl gebauten Stative schließt sich wieder mehr an die des Marshallschen Mikroskops an. Hierdurch werden viele, zweifellos dem Culpeper-Scarletschen Mikroskop infolge der Rückkehr zum alten Dreibeinstativ noch anhaftende Unvollkommenheiten endgültig verlassen. Das Urbild zu diesen Mikroskopen,

Abb. 13, entstammt der Werkstatt des uns schon vom einfachen Mikroskop her bekannten Londoner Optikers *Cuff*. Vom Marshallschen Stativ unterscheidet es sich nur in wenigen Punkten. Es ist dem allgemeinen Fortschritt entsprechend ganz aus Metall, mit einem Spiegel für durchfallendes und einer Beleuchtungslinse für auffallendes Licht versehen. Seine Weiterentwicklung durch *Martin*, *Adams*, *Jones* u. a. führt schließlich zu Formen, die für die Entwicklungsgeschichte des Stativs einen gewissen Abschluß bedeuten. Das Universalmikroskop nach *Jones* mag

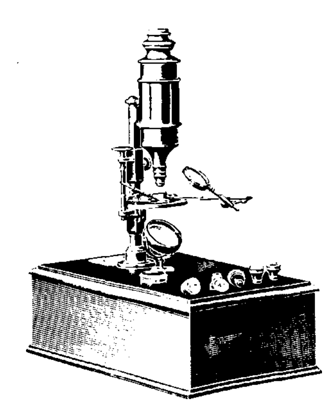


Abb. 13. Zusammengesetztes Mikroskop nach Cuff.

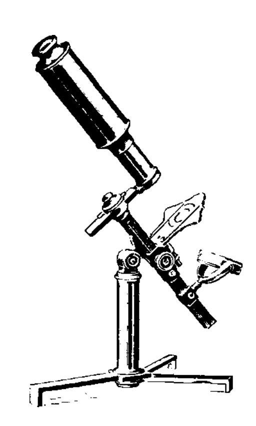


Abb. 14. Universalmikroskop nach Jones.

die um die Wende zum neunzehnten Jahrhundert erreichte Höhe veranschaulichen, Abb. 14. Natürlich wurden solche Mikroskope nicht nur in England gebaut. Auch in Deutschland, Holland und Frankreich lebten genug fähige Optiker, aus deren Werkstätten Mikroskope von ähnlicher Ausstattung und Güte in großer Zahl hervorgingen.

Wie wir bisher gesehen haben, hatte der mechanische Aufbau der einfachen und zusammengesetzten Mikroskope am Ende der ersten zweihundert Jahre ihrer Geschichte eine ganz beachtenswerte Höhe erreicht. Im Gegensatz dazu waren die Fortschritte bei der optischen Einrichtung beider Mikroskoparten verschwindend gering. Trotz vielfacher Bemühungen war man während jenes ganzen Zeitraumes mit der Verbesserung der Linsenfehler kaum über das hinausgekommen, was zu Beginn der Entwicklung unseres Instruments vorlag. Nach wie vor beherrschte für ernsthafte Untersuchungen, die stärkere Vergrößerungen erforderten, das einfache Mikroskop das Feld. Zwar waren seine Linsenfehler im Grunde ebensowenig verbessert wie die beim zusammengesetzten Mikroskop. Sie traten aber beim Arbeiten gerade

bei der Anwendung starker Vergrößerungen nicht so störend in Erscheinung wie bei diesem. Über die Natur der Linsenfehler war man sich auf Grund der Arbeiten vieler Physiker theoretisch schon lange durchaus klar. Trotzdem glückten Versuche, sie zu beheben, in befriedigender Weise erst im Anfang des neunzehnten Jahrhunderts.

Wollaston erkannte klar die Vorzüge der schon so oft für stärkere Vergrößerungen mit Vorteil benutzten Vollkugeln. Er erkannte aber auch, daß sie nur dann verhältnismäßig gute Bilder lieferten, wenn durch die Fassung ein großer Teil der Randstrahlen abgeblendet wird. Diese Erkenntnis wandte er bewußt in seinem „periskopischen" Mikroskop, Abb. 15a, auch auf Linsen an, die nur für schwächere Vergrößerungen bestimmt waren, indem er zwei Halbkugeln mit ihren ebenen Flächen aneinander legte und zwischen beide eine Blende schaltete. Diese ließ nur die Zentralstrahlen zur Wirkung kommen. Durch sein Verfahren erreichte er tatsächlich auch bei schwächeren Linsen eine wesentliche Verbesserung ihrer Eigenschaften.

Die Lichtverluste durch Spiegelung an den beiden Planflächen suchte später *Brewster* dadurch auszuschalten, daß er den Raum zwischen den beiden Halbkugeln mit einer Flüssigkeit von der gleichen Brechzahl wie die des Glases ausfüllte. Er fand indes bald eine noch bessere Lösung: er benutzte eine Vollkugel und versah diese mit einem ringförmigen Einschliff. Auf den gleichen Gedanken war fast zur selben Zeit auch *Coddington* gekommen. Seine Linsen unterschieden sich von den Brewsterschen nur durch die Form des Einschliffs, Abb. 15 b, c. Dieser übernahm die Aufgabe der Blende mit so gutem Erfolg, daß solche Lupen in der Folge sehr viel verwendet wurden. Unter dem Namen „Vogelaugenlinsen" waren sie lange Zeit allgemein bekannt und beliebt.

Was sich beim zusammengesetzten Mikroskop schon lange bewährt hatte, das Zusammenstellen mehrerer Linsen zu einem System, war bereits von *Joblot* auch beim einfachen Mikroskop mit Erfolg durchgeführt worden. *Euler* machte sich später als erster an die Aufgabe, die für die sphärische Korrektion günstigste Form solcher Linsensysteme durch theoretische Berechnungen zu finden. Das gelang ihm auch. Aber die Ausführung der berechneten Flächen mit der notwendigen Genauigkeit stieß in der damaligen Zeit auf unüberwindliche Hindernisse.

Über *Joblot* hinausgehende p r a k t i s c h e Erfolge in der Behebung sphärischer Mängel hat erst *Wollaston* mit seinen Dupletts, Abb. 15 d, und Tripletts gehabt. Er verzichtete allerdings auf eine rechnerische Vorausbestimmung der günstigsten Kombinationen, zog es vielmehr vor, diese durch Probieren zu ermitteln. Auf dem gleichen Weg gelang es nach ihm auch anderen Optikern, geeignete Zusammenstellungen von

zwei oder auch drei Linsen zu finden. Dupletts nach *Chevalier, Fraunhofer* oder *Wilson* werden zum Teil heute noch benutzt.

In viel stärkerem Maße als die erwähnten Formen hielten sich jedoch einfache Mikroskope im Gebrauch, bei denen achromatische Linsen verwendet wurden, deren Erfindung, wie wir bald sehen werden, von so umwälzender Bedeutung für das Mikroskop überhaupt werden sollte. Die wichtigste dieser Formen ist die aplanatische Lupe nach *Steinheil*, Abb. 15 e.

Achromatische Linsen wurden später auch in Dupletts oder Tripletts eingeführt, wodurch diese Formen wesentlich verbessert wurden. Einen weiteren Fortschritt erzielte man, als man dazu überging, einzelne Glieder jener achromatisierten Systeme nicht mehr zu verkitten. Unter dem Namen „Anastigmat-Lupen", Abb. 15 f, führt noch heute jede bessere optische Werkstätte derartige Systeme in verschiedener Form

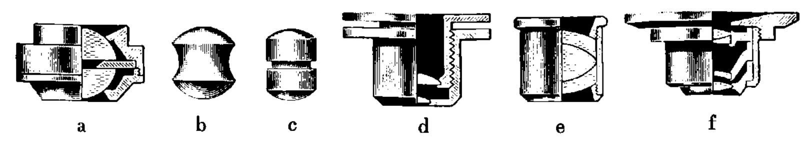


Abb. 15. Verschiedene einfache Mikroskope.

aus. Sie werden vornehmlich für Vergrößerungen zwischen 10x und 40x hergestellt und sind neben den noch schwächeren aplanatischen und einfachen Lupen das einzige, was sich aus der einst so glanzvollen Zeit des einfachen Mikroskops bis auf unsere Tage erhalten hat.

Mit der Erfindung der achromatischen Linsen begann nämlich eine vorher von keinem Menschen geahnte Vervollkommnung des zusammengesetzten Mikroskops. In wenigen Jahrzehnten wurden seine Leistungen derart verbessert, daß das einfache Mikroskop seine beherrschende Stellung unerwartet rasch verlor. Es erhielt sich zwar noch geraume Zeit für Arbeiten, bei denen man, wie etwa beim Präparieren, nur schwache Vergrößerungen und ein aufrechtes Bild braucht. Aber auch hier wurde es später mehr und mehr von Sonderformen des zusammengesetzten Mikroskops verdrängt.

Schon um die Mitte des achtzehnten Jahrhunderts war *Newton* durch theoretische Überlegungen zu der Erkenntnis gekommen, daß sich durch die Verbindung von brechenden Medien mit verschiedener Farbenzerstreuung die Farbenfehler der Linsen aufheben lassen müßten. Die Umsetzung seiner Erkenntnisse in die Praxis gelang ihm aber nicht. Sie scheiterte daran, daß er zu seinen Versuchen Stoffe mit ungeeigneter Farbenzerstreuung verwendete. Durch diese anfäng-

lichen Mißerfolge entmutigt, kam er zu der Überzeugung, daß die praktische Herstellung achromatischer Linsen überhaupt unmöglich sei und gab weitere Bemühungen zu ihrer Ausführung auf. Zu der gleichen Ansicht mußte zunächst auch *Euler* kommen, als er *Newtons* Versuche ebenfalls ohne Erfolg nachmachte. Erst als es *Dollond* 1757 tatsächlich gelungen war, achromatische Fernrohrobjektive zu entwickeln, und auch regelmäßig herzustellen, ließ er sich eines Besseren belehren. Er beschäftigte sich nunmehr eingehend mit der Theorie der Achromasie, wobei er schon das Mikroskop in den Kreis seiner Betrachtungen zog. Durch Eulers Arbeiten angeregt, berechnete *Fuss* 1774 ein achromatisches Mikroskop. Ausgeführt wurde ein solches aber doch erst 1784, also volle zehn Jahre später, von dem russischen Staatsrat *Aepinus*. Allerdings war dessen Gerät ein Monstrum von etwas über 1 m Länge. Es war daher kein Wunder, daß es für den forschenden Mikroskopiker niemals praktische Bedeutung erlangte. Es ging ihm darin ebenso wie dem achromatischen Mikroskop, das als erstes den gewöhnlich benutzten Mikroskopen auch äußerlich ähnelte, und das 1791 aus den geschickten Händen des holländischen Kavallerieobersten *François Beeldsnyder* hervorging. Auch dieses Instrument geriet merkwürdigerweise in Vergessenheit. Ja, es war überhaupt nicht allgemeiner bekannt geworden. Schuld daran mochte im wesentlichen die Tatsache gewesen sein, daß es nur sehr schwache Vergrößerungen lieferte. Infolgedessen konnte es mit den zu seiner Zeit für stärkere Vergrößerungen noch allgemein gebräuchlichen einfachen Mikroskopen nicht im entferntesten in Wettbewerb treten, und so war sein Schicksal besiegelt.

Stärkere achromatische Objektive fertigte erst 1807 und später *Van Deyl* in Amsterdam an. Seine Mikroskope gewannen deshalb auch eine gewisse Verbreitung, wenn auch die Linsen, mit denen er sie ausrüstete, immer noch keine so hohen Vergrößerungen lieferten, daß sie auf die Dauer mit den einfachen Mikroskopen erfolgreich hätten konkurrieren können. Das gleiche gilt für die an sich sehr guten Achromate von *Fraunhofer* in Deutschland, *Donnet* in Frankreich, *Tulley* in England und zunächst auch für die von *Amici* in Italien. Keinem dieser Optiker kam der Gedanke, mehrere achromatische Linsen zu einem System zusammenzusetzen, um zu Objektiven kürzerer Brennweite zu kommen, obgleich ja, wie wir gesehen haben, dieses Verfahren durchaus nicht mehr neu war. Hatte es doch schon *Sturm* etwa eineinhalb Jahrhunderte früher so erfolgreich angewandt. Die Sturmsche Idee auch bei den achromatischen Linsen erstmals durchgeführt zu haben, ist das Verdienst von *Selligue* und *Chevalier.* Im Jahr 1824 konnte *Selligue* der Akademie in Paris ein nach seinen Angaben von *Vincent* und *Charles Chevalier* angefertigtes achromatisches Mikroskop vorführen. Es war mit mehreren aus einer plankonkaven Flint- und einer

bikonvexen Kronglaslinse zusammengesetzten achromatischen Einzelobjektiven ausgerüstet, die man durch Zusammenschrauben zu einem Linsensystem verbinden konnte. *Selligues* Mikroskope erreichten bis zu 1200-fache Vergrößerungen. Damit erfüllten sie endlich in dieser Beziehung auch die höchsten Ansprüche. Die sphärische Korrektion ließ natürlich noch viel zu wünschen übrig, besonders bei so starken Vergrößerungen.

Da sich das Selligue-Chevaliersche Verfahren, Objektivsysteme aus achromatischen Einzelgliedern zusammenzusetzen, als äußerst fruchtbar erwies, wandten sich ihm sofort auch andere Mikroskoperbauer zu. Unter ihnen war es insbesondere der geniale Italiener *Amici*, dem das Mikroskopobjektiv in den folgenden Jahren so manche bedeutsame Verbesserung verdankt. Er verzichtete zunächst einmal darauf, die achromatischen Linsen einzeln und zusammengesetzt zu verwenden. Indem er diesen scheinbaren Vorteil aufgab, der in Wahrheit nur eine Kompromißlösung mit allen Schwächen einer solchen darstellt, gewann er die Möglichkeit, seine Systeme viel besser zu korrigieren. Nunmehr konnte er es ohne Schaden in Kauf nehmen, daß die einzelnen Glieder starke Aberrationen hatten, denn jetzt hatte er die Freiheit, sie so zu dem ganzen Objektiv zusammenzufügen, daß sich die Aberrationen gegenseitig aufhoben. In diesem Zusammenhang erfand er auch für die stärkeren Objektive die halbkugelförmigen Frontlinsen. Das Verfahren Amicis zog einen weiteren Vorteil unmittelbar nach sich: infolge der wesentlich besseren Korrektion konnte das Öffnungsverhältnis der Objektive ganz beträchtlich vergrößert werden. *Amici* glaubte zunächst noch, damit in erster Linie die Lichtstärke der Objektive zu steigern. Die Erhöhung des Öffnungsverhältnisses ließ ihn ferner (im Jahre 1829) auf den sehr bedeutenden Einfluß aufmerksam werden, den die Dicke des Deckglases auf die Güte des Bildes ausübt, und der den Mikroskopikern bis dahin völlig entgangen war. Auf Grund dieser Erkenntnis korrigierte er von nun ab alle seine Objektive nur noch für eine bestimmte Deckglasdicke.

In den folgenden zwei Jahrzehnten schritt der Italiener erfolgreich in der einmal eingeschlagenen Richtung vorwärts. Ihm folgten bald die meisten der damaligen Hersteller von Mikroskopen, wie *Ploessl*, *Merz*, *Oberhäuser* und andere nach, sehr zum Vorteil ihrer Erzeugnisse. In der gleichen Zeit wurde es den praktischen Mikroskopikern mehr und mehr offenbar, daß die Größe der Objektivöffnung nicht nur Einfluß hat auf die Lichtstärke des Objektivs, sondern daß ihr noch eine ganz andere Bedeutung zukommen muß. Denn bei derselben Vergrößerung lösten Objektive mit größerer Öffnung in jedem Fall feinere Einzelheiten des Objekts auf, als solche mit kleinerer. Der wahre Grund der Erscheinung blieb allerdings vor der Hand noch verborgen.



Fortan bemühte man sich jedenfalls, das Öffnungsverhältnis der Objektive noch weiter zu steigern, als das bisher schon gelungen war. Wieder ist es *Amici*, dem wir mit der Einführung des Prinzips der Immersion [1]), das er 1850 bekanntmachte, einen ganz wichtigen Fortschritt bei diesen Bestrebungen verdanken. Wie bedeutungsvoll dieser Fortschritt war, vermochten die zeitgenössischen Mikroskopiker noch gar nicht recht zu beurteilen. Sie sahen vorläufig nur die Nachteile, die mit dem Gebrauch von Immersionsobjektiven verbunden waren, und standen deshalb der neuen Erfindung meist mehr oder weniger ablehnend gegenüber. Als Immersionsflüssigkeit verwendete *Amici* zuerst das Wasser. Daneben unternahm er auch Versuche mit allen möglichen anderen Flüssigkeiten. Da er unter ihnen eine geeignetere aber nicht auffinden konnte, blieb er vorläufig beim Wasser.

Wie alle seine Vorgänger erreichte *Amici* seine bewunderswerten Leistungen auf eine uns heute durchaus unvollkommen anmutende Weise. Für ihn galt es stets, die beste Korrektion durch das natürlich wenig rationelle Ausprobieren ausfindig zu machen, denn einen anderen, exakteren Weg gab es eben für den Mikroskoperbauer damaliger Zeit noch nicht.

> Auch „*Carl Zeiss* ist, als er, von *Schleiden* angesport, bald nach seiner Niederlassung in Jena [2]) der Mikroskopoptik sich zuwandte, gleichfalls den eben charakterisierten Weg gegangen, und hat zunächst auf diesem, schlecht und recht, wie andere vor ihm und andere neben ihm, vorwärts zu kommen gesucht unter Anlehnung an die Vorbilder, die sich ihm in den Leistungen der älteren Meister boten. Kein Geringerer als *Schleiden* hat ihm auch bezeugt, daß er nach kurzer Zeit zu sehr bemerkenswerten Erfolgen gelangt ist. *Zeiss* selbst aber ist, wie er später erzählte, hinsichtlich dieser Erfolge schon sehr früh recht skeptisch gewesen. Er merkte, daß er, als Autodidakt an dieses Arbeitsfeld herangekommen, also ohne Anteil an der Summe von traditioneller Erfahrung, die auf ihm gewonnen war, den anderen gegenüber, die schon durch Jahrzehnte hin jene eigenartige Kunst geübt hatten, sehr im Nachteil sei, und als Autodidakt auch frei von allzu großer Verehrung für das traditionell gegebene, fand er bald, daß diese ganze Art des Arbeitens im letzten Grund für die Optik eigentlich irrationell sei. Er sagte sich: da alle Wirkungen, die eine Linsenkombination begleiten, auf Gesetzen beruhen, die durch die wissenschaftliche Optik genau festgestellt, in allen Einzelheiten mathematisch bestimmbar sind, und

---

[1]) Immersionsobjektive sind Linsensysteme, deren Frontlinse mit dem Gegenstand durch eine Flüssigkeit — heute meist Wasser oder Zedernholzöl — verbunden ist. Nach der Abbeschen Theorie bewirkt das eine Erhöhung der Apertur und damit des Auflösungsvermögens.

[2]) Im Jahre 1846.

da auch alle maßgebenden Eigenschaften des wirksamen Stoffes, des Glases, auf das strengste meßbar sind — so muß es für den Aufbau der Linsensysteme jeder Art noch einen ganz anderen Weg geben, um eine verlangte Wirkung mit Sicherheit des Erfolgs herbeizuführen. Es muß auf diesem Gebiet noch eine ganz andere Art des Zusammenwirkens von wissenschaftlicher Lehre und technischer Kunst möglich sein, als bisher bestanden hat; es muß möglich sein, nicht nur die allgemeine Direktive für die zweckmäßige Zusammensetzung der Elemente aus der Theorie zu entnehmen, sondern die richtige Zusammensetzung selbst bis in ihre letzten Einzelheiten für jede verlangte Wirkung. Wie der Architekt ein Bauwerk, bevor eine Hand zur Ausführung sich rührt, schon im Geiste vollendet hat, nur unter Beihilfe von Zeichenstift und Feder zur Fixierung seiner Idee, so muß auch, dachte sich *Zeiss*, das komplizierte Gebilde von Glas und Metall, wie das Mikroskop es erfordert, sich aufbauen lassen, rein verstandesmäßig, in allen Elementen bis ins letzte vorausbestimmt in rein g e i s t i g e r Arbeit, durch theoretische Ermittlung der Wirkung aller Teile, bevor diese Teile noch körperlich ausgeführt sind. Der arbeitenden Hand dürfe dabei keine andere Funktion mehr verbleiben, als die genaue Verwirklichung der durch die Rechnung bestimmten Formen und Abmessungen aller Konstruktionselemente und der praktischen Erfahrung keine andere Aufgabe, als die Beherrschung der Methoden und Hilfsmittel, die für letzteres, die körperliche Verwirklichung, geeignet sind. — Also: eine andere Grenzregulierung zwischen der Arbeit des Verstandes und der Arbeit der Hand, zwischen wissenschaftlicher Theorie und praktischer Kunst, grundsätzlich verschieden von der früheren Abgrenzung der Funktionen beider. Das nun ist die Idee, die *Carl Zeiss* in die Mikroskopoptik eingeführt und über alle Hindernisse hinweg zur Verwirklichung gebracht hat: die Idee eines streng r a t i o n a l e n Aufbaues der optischen Konstruktionen für das Mikroskop; das ist der Keim, aus dem alle inneren Fortschritte und alle äußeren Erfolge, die sein Wirken gebracht hat, hervorgegangen sind. D a s soll es besagen, wenn als Verdienst von *Carl Zeiss* hingestellt wurde: das geordnete (nämlich das n e u geordnete) Zusammenwirken von Wissenschaft und technischer Kunst auf seinem Arbeitsfeld zielbewußt angebahnt zu haben [3]).“

Carl Zeiss vertrat hierbei die technische Kunst, und er hatte das Glück, nach einem ersten mißglückten Versuch in *Ernst Abbe* einen Vertreter der Wissenschaft für seine Ideen gewinnen zu können, der wie kein zweiter für die Aufgabe geschaffen war, deren Lösung ihm vor-

---

[3]) Ernst Abbe, Gedächtnisrede zur Feier des 50 jährigen Bestehens der Optischen Werkstätte. Gehalten am 12. Dezember 1896; in: Ernst Abbe, Gesammelte Abhandlungen, 3. Bd. S. 64/65.

schwebte. In den ersten Jahren nach der Bekanntschaft stand *Abbe* mit der Zeiss'schen Werkstätte nur in loser Verbindung. Nach und nach gestaltete sich diese jedoch immer enger, bis sich schließlich der junge Gelehrte dazu bestimmen ließ, als Teilhaber in das Geschäft einzutreten. Von diesem Zeitpunkt an widmete er sich mit seltener Hingabe seiner großen Aufgabe. Als wissenschaftlicher Leiter der Zeissschen Werkstätte erstrebte er vornehmlich dreierlei: eine Vertiefung der theoretischen Erkenntnis, eine vermehrte Genauigkeit der Arbeit und eine Verbesserung des Werkstoffes. Zunächst machte er sich an die Lösung der vorläufig wichtigsten Frage, an die rechnerische Vorausbestimmung von Mikroskopobjektiven. Dabei konstruierte er anfangs Objektive mit ziemlich kleinen Öffnungswinkeln. Er erreichte so zwar eine wesentlich bessere Strahlenvereinigung, als man sie je zuvor für möglich gehalten hatte, mußte aber bei der praktischen Prüfung der Objektive die enttäuschende Beobachtung machen, daß die theoretisch so schönen Systeme weniger leisteten, als die älteren und schlechter korrigierten. „Also hatte doch der Öffnungswinkel eine besondere Funktion für die Abbildung, wie die praktischen Mikroskopiker schon seit Jahren behaupteten. Aber welche und wieso?"

Auf Grund langer und umfangreicher praktischer Versuche konnte wenig später *Abbe* diese so außerordentlich wichtige Frage eindeutig beantworten und theoretisch begründen. Er stellte mit Hilfe von künstlich angefertigten, unter das Mikroskop gebrachten feinen Objekten fest, daß diese, als beugendes Gitter wirkend, von einer weit entfernten Lichtquelle eine Reihe von Beugungsspektren erzeugen. Von diesen kann, entsprechend dem Öffnungswinkel des Objektivs vielfach nur eine gewisse Anzahl durch die Objektivöffnung ins Mikroskop eintreten. Das eigentliche Bild wird nun durch die Interferenz derjenigen interferenzfähigen — kohärenten — Strahlen erzeugt, welche von dem von der Objektivöffnung durchgelassenen Teil des Beugungsspektrums ausgehen. Blendet die Objektivöffnung keine Spektren von nennenswerter Intensität ab, dann ist das Bild dem Objekt ähnlich. Es wird umso unähnlicher, je mehr Spektren als Quelle interferenzfähiger Strahlen ausfallen. Kann nur noch das nichtabgelenkte Maximum oder nur ein einziges der abgelenkten Maxima ins Objektiv eintreten, so löst dieses die beugende Struktur überhaupt nicht mehr auf.

Mit diesen Untersuchungen war die Bedeutung der Größe der Objektivöffnung für das Auflösungsvermögen klargestellt und die Erscheinung auf die bekannten Tatsachen der Beugung zurückgeführt. Demgemäß erkannte *Abbe* auch, daß die Anzahl der ins Objektiv eintretenden Spektren nicht nur vom Öffnungswinkel abhängt, daß vielmehr auch die Brechzahl des Mittels zwischen Objekt und Objektiv sowie die Wellenlänge des zur Abbildung benutzten Lichts eine Rolle

spielen. Die sämtlichen maßgebenden Größen vereinigte er in der bekannten Formel für das Auflösungsvermögen:

$$d = \frac{\lambda}{n \sin \sigma} = \frac{\lambda}{A} \text{ }^{4)}$$

Den Faktor n sin σ = A nannte *Abbe* die numerische Apertur. In ihr hatte er das allein richtige Maß für die Funktion der Objektivöffnung gefunden.

Nach diesen neuen und grundlegenden Erkenntnissen hatte man also den Mikroskopobjektiven eine möglichst hohe Apertur zu geben. Um die hierbei erzielten Ergebnisse genau verfolgen zu können, mußte man imstande sein, den Wert dieser Größe genau zu messen. Wieder verdankt die Kunst des Mikroskopbaues *Abbe* die Einführung genauer Verfahren zu diesem Zweck. In dem nach ihm benannten Apertometer ersann er ein Gerät, das auch heute in seiner Art noch unübertroffen dasteht.

Auch die Beleuchtung der Objekte wurde durch Abbes Arbeiten über den Strahlenverlauf und die Strahlenbegrenzung im Mikroskop auf eine sichere theoretische Grundlage gestellt. Für ihre praktische Durchführung hat er mit dem bekannten, heute an jedem besseren Mikroskop angebrachten und ebenfalls seinen Namen führenden Beleuchtungsapparat bahnbrechende Arbeit geleistet.

Bei den Bemühungen, das Auflösungsvermögen durch Vergrößerung der Apertur zu erhöhen, bedeutet die Einführung der homogenen Immersion einen wichtigen Fortschritt. Als Immersionsflüssigkeit hatte *Abbe* nach langem Suchen das eingedickte Zedernholzöl gewählt, da es den Ansprüchen an Brechzahl und Dispersion weitaus am besten genügte. Und schon im Jahre 1873 konnte er rückblickend feststellen, daß das Mikroskop sich in Bezug auf die Größe der Apertur und infolgedessen in Bezug auf die Höhe der nutzbaren Vergrößerung der erreichbaren Grenze so weit genähert hatte, daß weitere Fortschritte nach dieser Richtung kaum noch zu erhoffen waren. Sehr erwünscht war dagegen noch eine weitere Verbesserung der Strahlenvereinigung. Eine solche war aber mit den zunächst zur Verfügung stehenden Glasarten unter keinen Umständen zu erreichen. Nur ganz neue Gläser mit wesentlich anderen Eigenschaften konnten hier helfen. Die Aussichten aber, solche zu erhalten, waren vor der Hand noch äußerst gering. *Abbe* jedoch war nicht der Mann, sich hier mit den gegebenen Tatsachen einfach abzufinden. Mit gewohnter Tatkraft versuchte er vielmehr, die seinen Absichten entgegenstehenden Zustände auf dem Gebiete der optischen Gläser zu wandeln.

---

4) Die Formel gilt in dieser Form nur für die Beleuchtung mit geradem Licht und sehr kleiner Apertur. Für schiefes Licht oder sehr hohe Beleuchtungsaperturen muß sie lauten:

$$d = \frac{\lambda}{2A}$$

Durch einen glücklichen Zufall lernte er in *Otto Schott* den Mann kennen, der wie kaum einer bis dahin in die Geheimnisse der Glasschmelzkunst eingedrungen war. *Schott* interessierte sich sehr für *Abbe*s Wünsche hinsichtlich neuer Gläser für optische Zwecke, und auf *Abbe*s lebhaftes Drängen hin ließ er sich bald zu einer engeren Zusammenarbeit bereitfinden. Die ersten in kleinerem Maßstab unternommenen Versuche eröffneten schon nach kurzer Zeit so aussichtsreiche Ausblicke, daß man bald mit aller Energie daranging, die erarbeiteten Glasflüsse im Großen herzustellen. Mit Hilfe solcher neuen Glasarten gelang es *Abbe* dann auch sehr rasch, Objektive zu errechnen

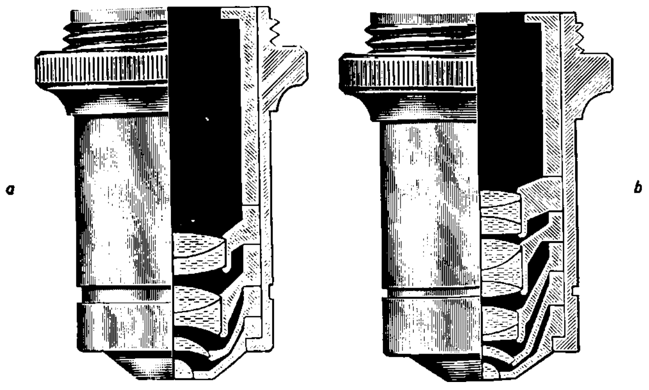


Abb. 16. Ein achromatisches (a) und das entsprechende apochromatische (b) Objektiv. Schema.

und herstellen zu lassen, die, mit besonderen Okularen, den Kompensationsokularen verbunden, in Bezug auf die Vollkommenheit der Strahlenvereinigung selbst den höchsten Ansprüchen genügten. Er gab ihnen den Namen Apochromate, Abb. 16. Mit ihnen, die nunmehr die höchsten erreichbaren Aperturen mit der vollkommensten Korrektion vereinigten, war in der Entwicklung der Mikroskopoptik ein gewisser Abschluß erreicht. Wohl wurden von den führenden optischen Werkstätten auch in der Zeit nach *Abbe* noch weitere Verbesserungen eingeführt, aber grundlegend Neues auf dem Gebiete der Mikroskopoptik ist seit der Veröffentlichung der Apochromate im Jahre 1886 kaum noch gefunden worden.

Auch in unserem Jahrhundert ruhten selbstverständlich die Versuche keineswegs, das Auflösungsvermögen des Mikroskops noch weiter zu steigern. Nur versuchte man dieses Ziel weniger durch die Erhöhung der numerischen Apertur, als vielmehr auf den anderen noch möglichen Wegen zu erreichen. Am meisten Erfolg hatte hierbei *A. Köhler*

mit der Einführung kurzwelligen Lichts zur Beleuchtung und Abbildung in die Mikroskopie. Wie die Abbesche Formel lehrt, wächst ja das Auflösungsvermögen mit abnehmender Wellenlänge des zur Abbildung verwendeten Lichts. Lichtquellen für ultraviolettes Licht standen schon länger in größerer Auswahl zur Verfügung. Aber zunächst fehlte es durchaus an einer geeigneten optischen Ausrüstung, denn bekanntlich ist Glas für so kurzwelliges Licht nicht mehr durchlässig. Als einigermaßen brauchbarer Rohstoff kam hier eigentlich

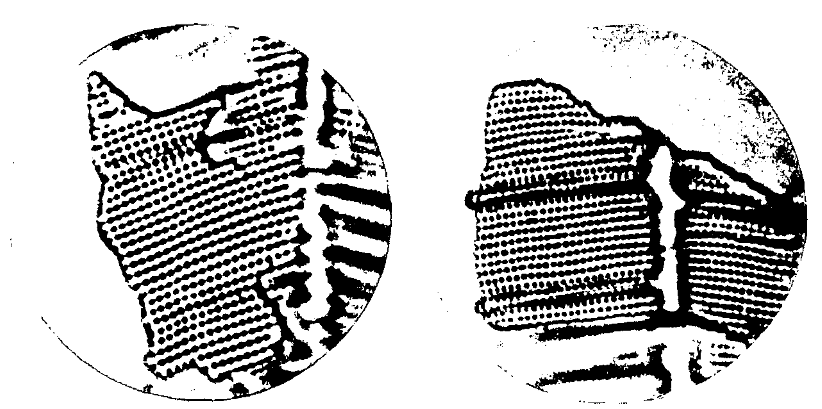


Abb. 17. Die Steigerung des Auflösungsvermögens durch ultraviolettes Licht. Die Aufnahme zeigt Bruchstücke aus der Kieselschale der Diatomee Surirella gemma, links mit gewöhnlichem, rechts mit ultraviolettem Licht aufgenommen. Nach der Aufnahme mit gewöhnlichem Licht kann man sich noch keine Vorstellung von der feineren Schalenstruktur machen, wohl aber nach der im ultravioletten Licht.

nur Quarz und Flußspat in Betracht. Bei ersterem störte die Doppelbrechung und bei letzterem lag die Brechzahl sehr ungünstig. Außerdem kannte man keine Möglichkeit, brauchbare Objektive aus einem einzigen Werkstoff herzustellen. Die letztgenannte Schwierigkeit konnte indessen bald überwunden werden. Es gelang *von Rohr,* in den Monochromaten eine Objektivart aufzufinden, bei der unter Beschränkung auf Licht e i n e r Wellenlänge die sphärische Korrektion so gut ist wie sonst nur bei den besten Apochromaten. Als es schließlich auch noch möglich war, amorphen, deshalb von Doppelbrechung freien, Quarz durch Schmelzen von Bergkristall herzustellen, war der Weg zu praktischen Versuchen mit kurzwelligem Licht frei. Das zur Beleuchtung notwendige monochromatische Ultraviolett wurde und wird noch heute durch spektrale Zerlegung aus dem Licht des zwischen Elektroden aus geeigneten Metallen überspringenden elektrischen Funkens erzeugt. Die direkte Betrachtung der mit solchem kurzwelligen

Ultraviolett erzeugten Bilder ist natürlich ausgeschlossen, da die Empfindlichkeit des menschlichen Auges nicht mehr bis in das verwendete Spektralgebiet (meist $\lambda = 2750$ Å) hineinreicht. Deshalb mußte man zu einem indirekten Verfahren greifen. Man hält die Bilder photographisch fest und verwendet erst diese Bilder zur eigentlichen Untersuchung. Unter Benutzung ultravioletten Lichts der angeführten Wellenlänge läßt sich heute das Auflösungsvermögen und die förderliche Vergrößerung des Mikroskops bis etwa auf das Doppelte desjenigen steigern, das man mit den besten Objektiven bei gewöhnlichem Licht erzielt, Abb. 17. Das bedeutet das Äußerste, was bei dem heutigen Stand unserer Kenntnisse theoretisch und praktisch überhaupt erreichbar ist. Ein weiterer wesentlicher Fortschritt ist kaum noch zu erwarten, und andere Wege, auf denen man mit dem Lichtmikroskop weiterkommen könnte, sind zur Zeit nicht bekannt. Man kann deshalb in der Tat mit einem gewissen Recht behaupten, daß das Lichtmikroskop in bezug auf die optische Leistungsfähigkeit den Endpunkt seiner Entwicklung erreicht hat.

Damit soll nun nicht gesagt sein, daß man auf völlig anderen Wegen und mit ganz anderen Verfahren mit der Steigerung von Auflösungsvermögen und förderlicher Vergrößerung nicht noch viel weiter kommen könnte. In der Tat hat sich auch in den letzten drei bis vier Jahren ein solcher Weg gezeigt, der heute lebhaft besprochen wird. Es hat sich nämlich herausgestellt, daß ein Elektronenstrahl stets von einer elektromagnetischen Welle von ganz außerordentlich kurzer Wellenlänge begleitet wird, und daß sich Elektronenstrahlen durch magnetische oder elektrische Felder so beeinflussen lassen, daß die von einem Punkt einer Elektronenquelle ausgehenden Elektronen sich wieder in einem Punkt vereinigen, sich also verhalten, wie Lichtstrahlen, die durch eine Linse gehen. Durch geeignete Wahl der elektrischen oder magnetischen Felder und eventuell durch wiederholte Anwendung solcher Felder kann man eine Art vergrößerte Abbildung der Elektronenquelle, ja sogar eines mit Elektronenstrahlen beleuchteten Gegenstandes erzielen. Die Bilder lassen sich auf einem Fluoreszenzschirm beobachten oder photographisch festhalten. Wendet man die Abbesche Theorie auf dieses sogenannte Elektronenmikroskop, wie es wegen der Ähnlichkeit seines Strahlenganges mit dem des Lichtmikroskops genannt wird, an, so ergibt sich, daß sich mit ihm auf Grund des aus der Wellenlänge errechneten Auflösungsvermögens eine um etwa 100 000 mal höhere förderliche Vergrößerung erreichen lassen müßte.

Versuche hierzu, die von verschiedenen Seiten mit großem Eifer in Angriff genommen wurden, berechtigen auch zu einigen Hoffnungen. Allerdings sieht man sich noch vor außerordentlichen Schwierigkeiten, die zu überwinden zur Zeit noch keine Aussicht besteht. Z. B. ist es

vorläufig nicht möglich, die „Linsenfehler" der „Elektronenlinsen", d. h. der zur Ablenkung des Elektronenstrahls benutzten elektrischen oder magnetischen Felder in dem Maße zu korrigieren, wie es bei den kurzen in Frage kommenden Wellenlängen notwendig ist. Da aber die Entwicklung des Elektronenmikroskops gerade erst angefangen hat, kann man wenigstens hoffen, daß sich im Laufe seiner Weiterentwicklung hier doch noch Erfolge erzielen lassen. Anders ist das bei einer zweiten und viel bedenklicheren Schwierigkeit. Diese beruht auf der Tatsache, daß es auf den Gebieten, wo eine Erhöhung der förderlichen Vergrößerung noch erwünscht wäre, wie z. B. in der Biologie oder in der Medizin, kaum Objekte gibt, die einer Durchstrahlung mit Elektronen ausgesetzt werden können, ohne sofort vollständig zerstört zu werden. Ob diese Schwierigkeit sich jemals wird überwinden lassen, ist durchaus fraglich. Wie sich die weitere Entwicklung des Elektronenmikroskops aber auch gestalten mag, das Lichtmikroskop wird selbst durch das vollkommenste Elektronenmikroskop niemals verdrängt werden. Dieses kann es höchstens in wertvoller Weise ergänzen, falls die notwendigen Fortschritte vielleicht noch erzielt werden sollten, denn man wird immer neben den höchsten erreichbaren Vergrößerungen starke, mittlere und schwache brauchen, wie sie durch die Linsenoptik einfacher, billiger und in höchster Leistungsfähigkeit zur Verfügung stehen.

Die Zeit nach der Erfindung der achromatischen Linsen bis auf unsere Tage, die, wie wir im Vorhergehenden sahen, so umwälzende Erfindungen und Verbesserungen an dem optischen Teil des Mikroskops brachte, ging natürlich auch nicht spurlos am Stativ selbst vorüber. Wir verschaffen uns deshalb zum Schluß noch einen kurzen Überblick über die Wandlungen, welche die Stativformen während jenes Zeitraumes durchgemacht haben. Dabei ist es selbstverständlich unmöglich, alle je auf den Markt gekommenen Stative und ihre Erbauer zu erwähnen. Wir müssen uns vielmehr darauf beschränken, eine gewisse Linie der Entwicklung herauszuarbeiten und zu verfolgen. Nach der Erfindung der achromatischen Linsen und Linsensysteme war, wie erwähnt, das einfache Mikroskop für stärkere Vergrößerungen bald gänzlich außer Gebrauch gekommen. Nur schwächere und mittelstarke Lupen konnten sich auch weiterhin erhalten, da sie hauptsächlich wegen der aufrechten und seitenrichtigen Bilder für Präparierarbeiten noch unentbehrlich waren. Um sie für diese Zwecke bequem halten zu können, wurden vorwiegend zweierlei Stativarten ausgeführt. Es war das einmal das sogenannte Präparierstativ, das sich in seinem konstruktiven Aufbau durchaus an die einfachen Mikroskope der Cuffschen Bauart aus dem achtzehnten Jahrhundert anlehnt. Von ganz einfachen Formen aus entwickelte es sich am Ende des vorigen und in den ersten Jahren unseres Jahrhunderts zu höchst voll-

kommenen Geräten, Abb. 18 b, die mit allem für das Präparieren notwendigen und erwünschten Einrichtungen ausgestattet waren.

Die Form dieser Stative änderte sich nicht wesentlich, als in neuester Zeit das einfache Mikroskop auch in der präparativen Technik allmählich durch das zusammengesetzte verdrängt wurde. Das geschah hauptsächlich durch das binokulare Mikroskop nach *Greenough*, Abb. 18 c, in dem der alte Konstruktionsgedanke eines *Cherubin d'Orléans* in neuer

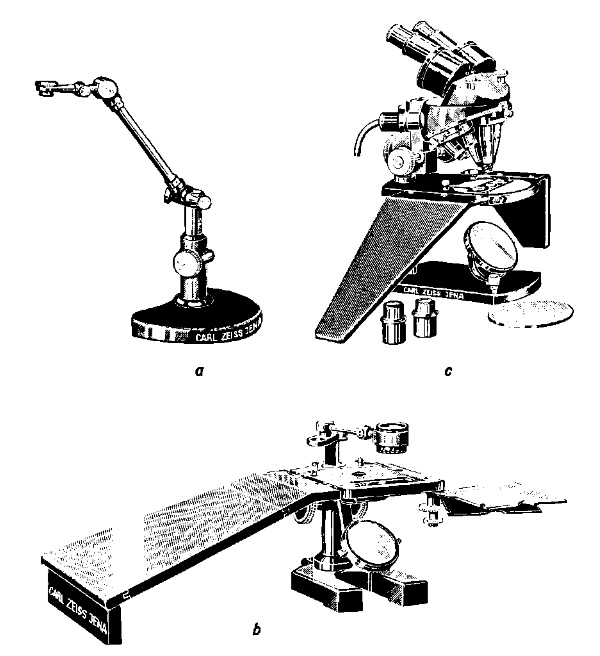


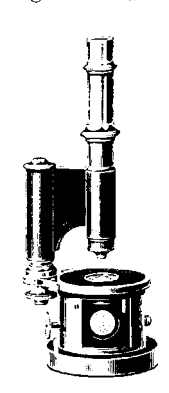
Abb. 18. Lupenhalter, altes und modernes Präpariermikroskop.

Form auflebte. Es setzte sich so erfolgreich durch, daß heutzutage einfache Mikroskope selbst zum Präparieren bei ganz schwachen Vergrößerungen gar nicht mehr gebaut werden. Der letzte Rest vom einfachen Mikroskop hat sich erhalten in den meist in Einschlagfassung verwendeten Taschen- oder Reiselupen, von denen die ganz schwachen als einfache Linsen, die stärkeren als aplanatische oder anastigmatische Lupen ausgeführt werden. Für solche und auch für in einfache Ringe gefaßte Lupen wurden Halter ausgebildet, in denen Bauformen aus der allerersten Zeit des Mikroskops wieder auferstanden sind. Solche Lupenhalter, Abb. 18 a, haben sich wie die Lupen mit nur ganz unwesentlichen Abwandlungen bis heute erhalten können. Allerdings

dienen sie jetzt nur noch als behelfsmäßige Einrichtungen, meist dort, wo wegen des Preises höher entwickelte Geräte nicht beschafft werden können.

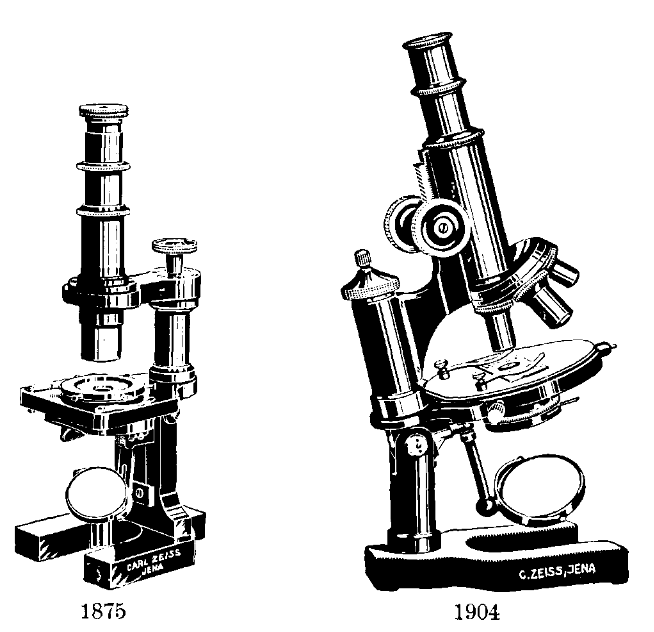
Beim zusammengesetzten Mikroskop haben die gleichen Männer, die die Entwicklung seiner Linsen so maßgebend beeinflußten, auch Anteil an der Weiterbildung der Stative. Manche von ihnen, wie etwa *Charles Chevalier* oder auch *Amici*, waren allerdings etwa um die Mitte des neunzehnten Jahrhunderts mit ihren großen und unhandlichen Universalmikroskopen in eine Sackgasse geraten. Ungefähr gleichzeitig erfolgte jedoch durch *Oberhäuser* und *Arthur Chevalier* die Rückkehr zu Stativformen ohne alles überflüssige Beiwerk. Als erstes dieser Art ist das von *Oberhäuser* um 1835 gebaute „Grand microscope

Abb. 19. Trommelmikroskop (Grand microscope achromatique) von Oberhäuser, 1835.



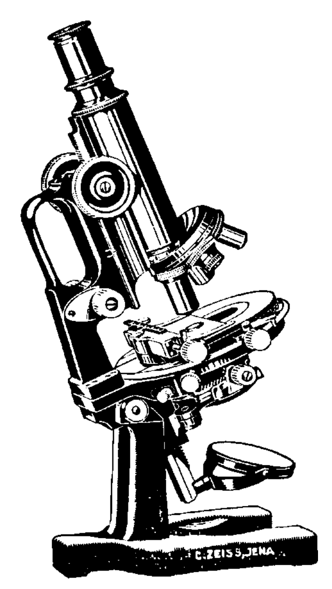
achromatique", Abb. 19, anzusprechen. Bei ihm besteht der Fuß aus einer schweren Trommel mit seitlichem Ausschnitt, durch den das Licht auf den Beleuchtungsspiegel gelangen kann. Die grobe Einstellung erfolgt, wie bei sehr vielen späteren einfachen Stativen, durch Verschieben des Tubus in seiner Hülse mit der Hand. Die Mikrometerbewegung wirkt direkt auf den seitlich am Objekttisch befestigten Tubusträger. Wegen der mangelhaften Zugänglichkeit der Beleuchtungseinrichtungen verließ *Oberhäuser* den trommelförmigen Fuß wenige Jahre später und ersetzte ihn durch den Hufeisenfuß. Inzwischen hatte auch *Arthur Chevalier* seine Stative in gleicher Weise durchgebildet. Beiden folgten bald andere optische Werkstätten nach, wie Nachet, Merz, Plössl, später auch die neugegründeten von Zeiss, Leitz und andere, in der Erkenntnis, daß die neue Form die für das Mikroskop zweckmäßigste ist. Daß diese Erkenntnis richtig war, beweist die Tatsache, daß heute, obgleich schon wieder etwa ein Jahrhundert verflossen ist, sehr viele Mikroskope, wenn auch in Einzelheiten verbessert, und in der Formgebung dem Geschmack der Zeit

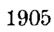
1858 1860 1861



1875 1904

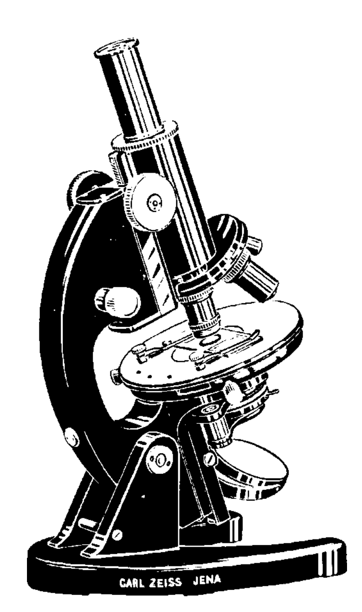
Abb. 20. Entwicklung des modernen Stativs.



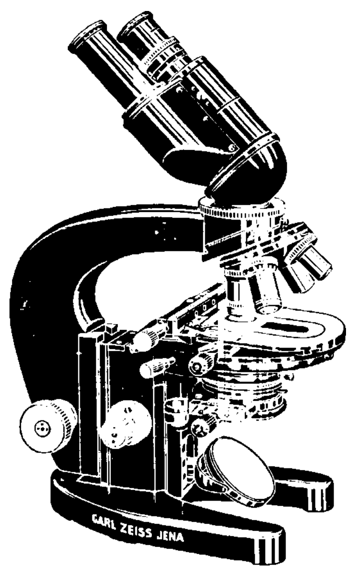

1905

C.ZEISS,JENA

1920



1925



1933

angepaßt, immer noch nach der gleichen Form gebaut sind. Auf einem hufeisenförmigen Fuß erhebt sich ein kurzes Trägerstück, an dem das gesamte Oberteil des Mikroskops, bestehend aus Tisch mit Beleuchtungseinrichtung und Tubusträger mit Tubus befestigt ist. Beispiele für die mehr äußerlichen Wandlungen, die das Stativ in der zweiten Hälfte des neunzehnten und in den ersten drei Jahrzehnten des zwanzigsten Jahrhunderts durchgemacht hat, geben einige von der Firma Zeiss während dieses Zeitraums auf den Markt gebrachten Mikroskope, Abb. 20. Ebensogut hätten natürlich Stative aus irgendeinem anderen optischen Werk als Muster gewählt werden können. Bei der Betrachtung der dargestellten Reihe fällt vor allem auf, daß die Stative äußerlich immer einfacher und glatter werden. Meist läßt sich das Stativoberteil, um leichter beobachten zu können, um eine waagerechte Achse neigen. Neuerdings hat man in einzelnen Fällen diese Kippung wieder verlassen und dafür nach älteren Vorbildern den Tubus abgeknickt. Dabei hat man als weiteren Vorteil die Möglichkeit gewonnen, den Antrieb von Grob- und Feinbewegung dicht über dem Fuß anordnen zu können. Die Grobbewegung erfolgt mit Ausnahme der ganz einfachen und billigen Stative jetzt immer durch Zahn und Trieb. Bei der Feineinstellung wurden im Laufe der Jahre und bei den verschiedenen Herstellern alle möglichen Mechanismen versucht, ohne daß es indessen restlos gelungen wäre, den heute aufs höchste gesteigerten Ansprüchen zu genügen.

Die neuesten Formen der Stative zeichnen sich, außer durch ihre harmonische Form, durch ihre recht große Ausladung und durch ihre außerordentliche Ausbaufähigkeit aus. Unter anderem lassen sich verschiedene Tische, neben festen z. B. Dreh- und Zentriertische, Kreuztische allerverschiedenster Bauformen, Tische ohne und mit Gradeinteilung und Heiztische, verschiedene Tuben, wie monokulare und binokulare, gerade und schräge, photographische und Polarisationstuben sowie alle möglichen sonstigen Nebenapparate anbringen, ja sogar bei den allerneusten Formen beliebig gegeneinander auswechseln.

All das ist eine Folge des immer mehr erweiterten Anwendungsbereiches unseres Gerätes in der Gegenwart. Ursprünglich war das Mikroskop ja ausschließlich ein Werkzeug des Naturforschers und des Arztes. So war es auch noch gegen Ausgang des vorigen Jahrhunderts. Mit dem Eindringen wissenschaftlicher Verfahren in die meisten Gebiete des praktischen Lebens jedoch wurde das anders. Das Mikroskop fand mehr und mehr Eingang auch in die Laboratorien und Arbeitssäle der Industrie und damit zusammenhängender Gebiete menschlicher Tätigkeit. Heute ist es dem Chemiker ebenso unentbehrlich für seine Arbeit, wie dem Metallographen, dem Textilfachmann und unzähligen anderen, gleichgültig ob sie sich mehr der Forschung oder mehr der Prüfung der Werkstoffe und der Fertigung widmen.

Hier reichte natürlich für viele Zwecke das übliche Stativ nicht mehr aus, ja es war direkt unbrauchbar. Als Folge davon entstanden eine große Zahl Sonderformen des Mikroskops, die den meist sehr weitgehenden Anforderungen der neuen Verbraucherkreise Rechnung tragen sollten. Sie alle hier auch nur zu erwähnen, würde jedoch schon viel zu weit führen. Wir beschränken uns auf zwei der wichtigsten, auf das Metallmikroskop und auf die Universal-Kameramikroskope, weil beide grundsätzlich neue Gedanken in den Mikroskopbau einführten.

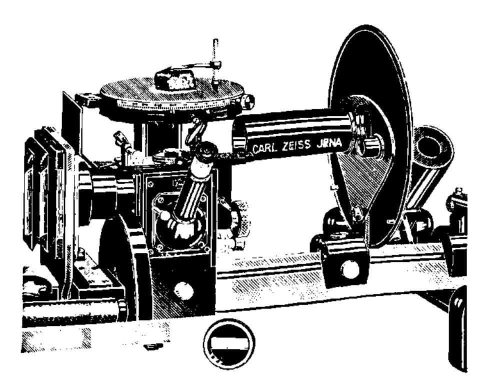


Abb. 21. Metallmikroskop (Neophotstativ von C. Zeiss).

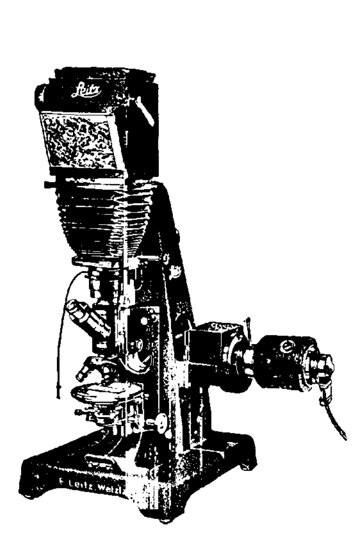


Abb. 22. Kameramikroskop (Panphot von Leitz).

Das Neue am Metallmikroskop, Abb. 21, ist die umgekehrte Anordnung aller Teile nach dem Vorgang von *Le Chatelier.* Die Tischfläche liegt zu oberst. Da nur auffallendes Licht benutzt wird, beschränkt kein Stativteil den zur Auflage des Objekts notwendigen Platz. Das Objektiv nebst allen übrigen Stativteilen befindet sich unter dem Tisch. Der Tubus ist so abgeknickt, daß man beim Beobachten in bequemer Haltung ins Okular schauen kann. Die Beleuchtung erfolgt bei Hellfeld mit einem sogenannten Vertikal-Illuminator, bei Dunkelfeld mit einem Auflicht-Dunkelfeldkondensor. Die meisten Metallmikroskope sind gleichzeitig mit einer mikrophotographischen Kamera verbunden, ein Grundsatz, der bei den Kameramikroskopen zum Hauptbaumerkmal erhoben ist. Bei ihnen ist Kamera und Beleuchtungseinrichtung mit dem Stativ zu einer geschlossenen Einheit verschmolzen.

Am eigentlichen Mikroskop lassen sich alle für die verschiedenen mikroskopischen Verfahren notwendigen Neben- und Ergänzungsteile anbringen. Der grundsätzliche Aufbau lehnt sich zum Teil mehr an das Metallmikroskop — Grundsatz des umgekehrten Mikroskops —, zum Teil mehr an das gewöhnliche, aufrechte Mikroskop an. Nach der ersteren Art sind das Metaphot von Busch und das MeF von Reichert, nach dem letzteren das Panphot von Leitz, Abb. 22, und, als jüngstes, das Ultraphot von Zeiss gebaut.

Wir sind mit der Erwähnung dieser jüngsten Bauformen am Ende unseres Überblicks über die Entwicklungsgeschichte des Mikroskops angelangt. Wir sahen, wie sich die ersten primitiven und unhandlichen Stative im Laufe von über dreihundert Jahren zu höheren und höchsten Formen entwickelten, und wie sich aus den am Anfang benutzten, wenig leistungsfähigen, einfachen Linsen durch die Arbeit einiger weniger genialer Männer, insbesondere aber durch das Wirken *Ernst Abbes*, Linsensysteme entwickelten, deren Leistungsfähigkeit heute eine Höhe erreicht hat, die kaum noch zu überbieten ist.

Schrifttum

Abbe, E.: Gesammelte Abhandlungen Bd. 1 bis 3. Jena 1906.

Harting, P.: Das Mikroskop. Deutsche Ausgabe Bd. 3, 2. Aufl., Braunschweig 1866.

Köhler, A.: Mikrophotographische Untersuchungen im ultravioletten Licht. Zeitschr. f. wiss. Mikroskopie Bd. 21 (1904).

Petri, R. J.: Das Mikroskop. Berlin 1896.

Die Druckstöcke für die Abb. 1 bis 21 wurden dankenswerterweise von der Firma Carl Zeiss, Jena, der Stock zu Abb. 22 von der Firma E. Leitz, Wetzlar, zur Verfügung gestellt.

Bau und Entwicklung des Erdballs

Von *H. Lorenz VDI,* München*)

1. Die Erdgestalt

Die Erdgestalt wird — unter Außerachtlassung der unregelmäßigen Erhebungen des Festlandes — bestimmt durch die Oberfläche der unter sich zusammenhängenden Weltmeere, die nach den Gesetzen der Hydrodynamik unter der gemeinsamen Wirkung der Schwere und Fliehkraft eine Gleichgewichtsfigur darstellt, zu der die Erdbeschleunigung senkrecht nach innen wirkt. Hätte die Erde keine Achsendrehung, so wäre nur die Schwere wirksam und die Meeresoberfläche eine Kugel. Die durch den Foucaultschen Pendelversuch nachweisbare Achsendrehung hat eine Fliehbeschleunigung zur Folge, deren Höchstwert am Erdäquator der Schwere entgegenwirkt und daher dort den Kleinstwert der Erdbeschleunigung bedingt, während sie an den Polen wirkungslos wird. Dadurch entsteht aber am Äquator eine Ausbauchung, sowie an den Polen eine Eindrückung der Erdoberfläche, die somit die Form einer Orange oder angenähert eines Umdrehungsellipsoids annimmt. Das Verhältnis des Halbmesserunterschiedes von 21,5 km zum Äquatorhalbmesser von 6378 km bezeichnet man als die Abplattung, die mit hinreichender Annäherung durch das Verhältnis der äquatoriellen Fliehbeschleunigung zur Schwerebeschleunigung 9,81 m/s^2 an der Oberfläche gegeben ist. Diese Fliehbeschleunigung ihrerseits wächst außer mit dem Achsenabstand noch mit dem Quadrate der Winkelgeschwindigkeit von 0,000073/s und beträgt am Äquator rund 1 : 289 der dort herrschenden Schwere, womit sogleich der Wert der Abplattung gegeben ist. Hierbei ist allerdings eine im Innern des Erdballs mit dem Zentralabstand wachsende Schwerebeschleunigung vorausgesetzt, was einer überall gleichen Dichte der Erde entsprechen würde, die durch Vergleich der Erdanziehung mit derjenigen einer bekannten Masse auf einen kleinen Probekörper sich zu 5,52 g/cm^3 ergab. Es heißt das nichts anderes, als daß die Erde 5,52mal soviel wiegt, wie eine gleich große Wassermasse, während z. B. der Mond nur eine Dichte von 3,33, die Sonne dagegen von 1,4 besitzt. Bei einem gleichfalls sich drehenden Welt-

*) Der Verfasser ist Ingenieur und war Professor an den Universitäten Halle und Göttingen, zuletzt an der Technischen Hochschule Danzig. Er ist bekannt durch Werke über Kältetechnik, Kreiselräder, Ballistik und ein Lehrbuch der Technischen Physik in vier Bänden, außerdem aber durch zahlreiche Abhandlungen in technischen, physikalischen und astronomischen Zeitschriften, deren Ergebnisse z. T. in der vorliegenden Schrift Verwendung fanden.

körper, dessen Hauptmasse im Mittelpunkt vereinigt wäre, wogegen man diejenige der Hülle vernachlässigen könnte, würde die Abplattung nur die Hälfte des Verhältnisses der Fliehbeschleunigung zur Schwere, im Falle der Erde also rd. 1:580 betragen. Demgegenüber hat man durch sogenannte Gradmessungen, d. h. durch die geodätische Längemessung je eines Bogengrades auf einem Erdmeridian in der Nähe des Nordpoles und am Äquator eine Abplattung von etwa 1:296 festgestellt[1]), woraus im Vergleich mit dem eben erwähnten Falle der zentralen Massenkonzentration auf eine, wenn auch nur mäßige Abweichung von der homogenen Dichteverteilung geschlossen werden kann. In der Tat haben die Gesteine, welche die Landmassen der Erdoberfläche bilden, nur eine Dichte von etwa 2,8, also wenig mehr als die Hälfte der mittleren Dichte des ganzen Erdballs. Demgemäß nimmt die Erdbeschleunigung, wie aus Messungen in tiefen Schächten hervorgeht, von der Oberfläche aus nach der Tiefe zu, um dann nach Überschreiten eines Höchstwertes, der übrigens durch diese Messungen nicht erreicht ist, wieder abzunehmen und schließlich im Erdmittelpunkt zu verschwinden. Die Gesteine bilden eine scheinbar zusammenhängende Schale des Erdkörpers, die auf dem viel dichteren Kern ruht. Die Gesamtoberfläche dieser Schale von 510 000 000 km^2 Flächeninhalt ist sehr unregelmäßig gestaltet und in ihren Einsenkungen durch das Weltmeer von 361 000 000 km^2 Fläche und einer Mitteltiefe von 3,8 km ausgefüllt, aus dem die Landmasse von 149 000 000 km^2 mit einer Mittelhöhe von 0,825 km über dem Seespiegel hinausragt. Das Verhältnis der Land- zur Wasseroberfläche ist demnach 1:2,42 oder rd. 5:12, während die unter Heranziehung der Tiefen und Höhen berechneten Rauminhalte der Land- und Wassermassen über dem ausgeglichenen gedachten Meeresboden $689 \cdot 10^6$ und $1370 \cdot 10^6$ km^3 mit einem Verhältnis von rund 1:2 betragen. Würde man den ganzen Landblock gleichmäßig über die Erdoberfläche verteilen, so würde der Meeresboden um 1,35 km erhöht und die Meerestiefe auf 2,7 km vermindert, der alsdann über die Gesamtfläche erstreckte Wasserspiegel aber nur 240 m über dem derzeitigen liegen. Es ist vielleicht noch bemerkenswert, daß die größte Landerhebung im Mount Everest 8,8 km, die größte Meerestiefe im Stillen Ozean dagegen 10,8 km mit einem Höhenunterschied von 19,6 km erreicht, der nur wenig geringer ist als der größte Halbmesserunterschied des abgeplatteten Erdballs.

Auf der festen und flüssigen Erdoberfläche ruht noch eine in der Hauptsache aus 0,23 Sauerstoff und 0,76 Stickstoff (Gewichtsteile), daneben auch Kohlensäure und Wasserdampf bestehende Lufthülle von einer noch unbekannten, jedenfalls aber mehrere 100 km betragenden

[1]) Es ist das der Mittelwert zahlreicher Meßergebnisse, die zwischen 1 : 293 bis 1 : 298, also 2 vH schwanken. Andererseits liefert die Analyse der Abplattung einer sich drehenden homogenen Flüssigkeit einen Wert von 1 : 230, also 5 : 4 des wirklichen, der recht gut mit der obigen Überschlagsrechnung übereinstimmt.

Höhe und einem Druck von 1,03 kg/cm^2 auf die Unterlage, der eine gleichförmige Wasserbedeckung von 10,3 m der ganzen Erdoberfläche entsprechen würde. Die Dichte dieser Lufthülle ist am Boden rd. 1 : 800 des Wassers und nimmt mit der Temperatur nach oben bis zum Verschwinden an der Grenze ab, wobei sich wahrscheinlich auch ihre Zusammensetzung merklich ändert. Die Lufthülle enthält nach Laufzeitmessungen zurückgeworfener elektromagnetischer Wellen in großen Höhen mehrere nachweislich durch die Sonnenstrahlung ionisierte Schichten und außer Spuren einiger Edelgase einen wenn auch nur schwachen Anteil an Ozon, der aber zur Abschirmung der von außen insbesondere von der Sonne eindringenden ultravioletten Strahlen ausreicht. Dadurch werden zwar Schädigungen der Organismen verhütet, aber auch ein wesentlicher Teil der Sternspektra zerstört und unsere Einsicht in das Wesen der Himmelskörper beeinträchtigt. In der Lufthülle wird ferner ein Teil der von der Sonne kommenden und von der Erde zurückgeworfenen Strahlung aufgenommen, in Wärme umgesetzt und dadurch ein z. B. auf dem Monde fehlender Temperaturausgleich zwischen Tag und Nacht geschaffen, der das Leben der Organismen erst ermöglicht. Die mit dem Einfallswinkel der Strahlung vom Äquator nach den Polen abnehmende Erwärmung bedingt aber an erster Stelle ein Aufsteigen der leichteren, an letzterer ein Absinken der schwereren Luft und führt zu einer oberen Strömung nach den Polen und einem Rückfluß am Boden, d. h. zu kalten Nordwinden auf der Nordhalbkugel. Da die aufsteigende Luft die große Umdrehungsgeschwindigkeit des Erdäquators von 0,463 m/s beibehält, so lagert sich über die eben beschriebene Zirkulation noch eine West-Ost-Strömung, die auf dem Weltmeere als Passatwind bezeichnet wird und noch von der Erddrehung in Wirbelung versetzte Luftmassen, sogenannte Zyklone, mit sich führt.

Diese Strömungen würden auf einer völlig vom Wasser bedeckten Erde ganz gesetzmäßig verlaufen, werden aber durch die Festländer mit ihrem ungleichmäßigen Küstenverlauf und ihren Erhebungen derart gestört, daß die Vorhersage des von ihnen bedingten Wetters erheblichen Schwierigkeiten begegnet.

Außerdem aber stellen sich unter der ungleichmäßigen Erwärmung des Meerwassers in verschiedenen Breiten mächtige Strömungen innerhalb der Ozeane ein, z. B. der sogenannte Golfstrom, der das im Mexikanischen Golf erwärmte Oberflächenwasser nach Nordosten trägt und dadurch ein milderes Klima der britischen Inseln und von Skandinavien mit sich bringt. Demgegenüber werden die amerikanischen Küsten des Atlantischen Ozeans auf gleichen Breiten von einem kalten Nordsüdstrom, der die von den Gletschern Grönlands abgestoßenen berüchtigten Eisberge trägt, bespült und sind im Zusammenhange damit kalten Ostwinden ausgesetzt, welche durch Herabsetzung der mittleren Jahrestemperaturen das Klima rauher gestalten.

2. Das Antlitz der Erde

Die feste Erdrinde, das sogenannte Sial (Silizium-Aluminium), besteht in der Hauptsache aus im Wasser schwer löslichen Kristallgemengen von Quarz, Oxyden, Carbonaten, Silikaten und Schwefelverbindungen der Leichtmetalle in kompakten Massen sowie in übereinandergelagerten Schichten, die wiederum häufig gespalten, gebrochen und gestürzt von gewaltigen, sowohl waagrechten als auch senkrechten Bewegungen nach ihrer Bildung Zeugnis ablegen. Auf solche Bewegungen, die sich sowohl auf lange Zeiträume unter zeitweiligem Richtungswechsel als sogenannte Epirogenese, d. h. Festlandsbildung, erstrecken, als auch ziemlich rasch vollziehen und noch immer fortdauern, sind nicht nur die Höhenunterschiede zwischen Meeresböden und Festländern, sondern auch die auf letzteren durch die sogenannte Orogenese aufgebauten Gebirge zurückzuführen. An diesen Bewegungen ist das Wasser am stärksten beteiligt, einmal durch Meeresströmungen infolge von Temperaturunterschieden in verschiedenen Breiten, durch von Winden bedingte Wellenbildung an der Oberfläche und Brandung an den Küsten sowie endlich durch den Niederschlag des von der Sonnenstrahlung an der Meeresfläche verdampften und nachher in den oberen Luftschichten wieder als Regen verflüssigten oder gar zu Schneekristallen erstarrten Wassers. Ein Teil des auf das Land fallenden Regens strömt als Oberflächenwasser unter Ausnutzung von Bodenneigungen abwärts, erweitert diese durch Auswaschen zu Tälern und gelangt in dem auf ihrem Grunde gebildeten Flußlauf wieder in das Meer. Ein anderer Teil sickert in den porösen Boden, durchfeuchtet ihn unter Aufnahme löslicher Salze bis zur undurchlässigen Schicht und tritt mit ihr in Quellen zutage. Denselben Weg nimmt der schmelzende Schnee, soweit er nicht vorher unter der Sonnenstrahlung unmittelbar verdunstet oder in hohen Gebirgslagen sich zu Firnschnee und Gletschereis verdichtet. In dieser plastischen Form erfüllt er hochgelegene Mulden und schiebt sich langsam unter teilweisem Abschmelzen unter Druck an der Sohle talabwärts, indem er das umgebende Gestein abschleift. Das Oberflächen- und Schmelzwasser dringt aber auch in feine durch innere von der Sonnenwärme ausgelöste Spannungen gebildete Risse in das Gestein und sprengt dieses infolge der Ausdehnung beim Gefrieren. Die durch solche vielfach durch Pflanzenwurzeln unterstützte Verwitterung abgetrennten Felsblöcke werden beim Absturz durch Aufschlag und Aneinanderreiben zerkleinert und teilweise noch weiter bis zu feinem Sand oder Ton zermahlen. So entstehen dann die an die Felsen angelehnten Schutthalden mit nahezu einheitlicher Böschung von 37° ($tg\,37° = 0{,}75$) in trockenem Zustande, welche durch Eindringen von kalkhaltigem Oberflächenwasser wieder zu sogenanntem Nagelfluh, einer Art natürlichen Betons, zusammenbacken können. Ein großer Teil der ver-

witterten Gesteine und Sandmassen wird dagegen von Gletschereis mitgenommen und in Moränen abgesetzt oder von den Gebirgswässern fortgeschleppt und schließlich im Flachlande oder im Meere als feiner Schlamm abgelagert, der alsdann unter dem Eigengewicht sowie durch Wasserdruck wieder zu geschichtetem Gestein zusammengepreßt wird. Auf diese Weise können unter Abtragung der Gebirge auch weite Waldgebiete verschüttet und verkohlt sowie ganze Meerbusen ausgefüllt werden, wofür viele Tiefebenen und die mächtigen Anschwemmungen am Unterlauf der Ströme zahlreiche Beispiele darbieten. Bodenerhebungen lassen die so gebildeten Ablagerungen und Sedimente zutage treten und führen zur Trockenlegung oft weiter Gebiete unter Salzausscheidung des in Vertiefungen verdünsteten Meerwassers und Bildung salzhaltiger Binnenseen. Dabei werden auch die Reste von Meeresorganismen abgeschlossen und unter Druck in Erdöl umgewandelt. Demgegenüber führen Bodensenkungen zur Überflutung von Land und Abtrennung von Inseln. Die Senkung von Inseln und Meeresküsten in den Tropen wird vielfach angezeigt und ausgeglichen durch das Aufsteigen von Korallenbänken, deren organische Erbauer nur an der Meeresoberfläche leben können und mit dem Absinken des Korallengerüstes absterben. Gewaltsame Bodenbewegungen und Verlagerungen entstehen bei Vulkanausbrüchen von zu Lava geschmolzenen Silikaten, die um den Kraterschlot sich auftürmt, teilweise aber durch mitausgestoßenen Wasserdampf und schwefelhaltige Gase in porösen Tuff verwandelt oder zerstäubt als Aschenregen an der Böschung niederfällt. Solche dauernd oder vorübergehend tätige, manchmal auch erloschene Vulkane sind von heißen Quellen und Gasausströmungen begleitet vielfach auf der Erde verbreitet und meist in der Nähe der Meeresküsten sowie auf Inseln reihenweise angeordnet. Sie bilden zweifellos die Verbindung mit einer unter der festen Erdkruste befindlichen flüssigen Magmaschicht, dem sogenannten Sima (Silizium-Magnesium), die vermutlich durch Volumenänderungen infolge chemischer Umsetzungen unter Mitwirkung äußerer Flutkräfte in stärkere oder schwächere Bewegungen gerät. Die ersteren äußern sich als Ausbrüche, die letzteren als Erdbeben, die mittels rascher Verdichtungswellen von rd. 12 km/s Geschwindigkeit den ganzen Erdball durchsetzen, während langsamere Querwellen sich mit etwa 6 km/s Geschwindigkeit über die Oberfläche verbreiten und in der Herdnähe merkliche Bodenschwankungen hervorrufen.

Aus all diesen Vorgängen begreift man, daß sich das Antlitz der Erde im Laufe langer Zeiträume seit Erstarrung ihrer Kruste mannigfach gewandelt hat und noch dauernd verändert, ohne daß es bisher möglich war, die Gründe für die derzeitige Gestalt der Festländer anzugeben. Insbesondere fällt beim Betrachten der Erdkugel nicht allein die Anhäufung von Landmassen auf der Nordhalbkugel mit offenem

Nordpolarmeer und einem Südpolarfestland inmitten einer überwiegenden Meeresbedeckung auf, sondern auch noch der fast ausschließliche Auslauf der Festländer in südlich gerichtete Halbinseln. Weiterhin bemerken wir noch in gemäßigten und Polarzonen eine starke Bildung tiefer Meeresbuchten, sogenannter Fjorde an westlichen Felsenküsten mit vorgelagerten Inseln, die immer starken Brandungen ausgesetzt sind und die Spuren einer früheren Vergletscherung zeigen. Solchen Spuren sind auch die oft weit ausgedehnten Moränenzüge an den Abhängen von Gebirgsketten und auf Niederungen zuzurechnen, deren Herkunft von oft entfernten Gebirgen durch die in ihnen enthaltenen Felsbrocken leicht nachzuweisen ist. Die Erdoberfläche hat in ihren mittleren Breiten und den Polargebieten demnach zeitweilig eine umfassende Eisbedeckung von Gebieten erfahren, die heute einen dichten Pflanzenwuchs besitzen und von Tieren und Menschen belebt sind. Andererseits müssen wir aus dem Vorhandensein von Kohlenflözen, die durch Verkohlung verschütteter Tropenwälder unter Luftabschluß und Druck entstanden sind, in mittleren und hohen Breiten auf ein wärmeres Klima in der Vorzeit schließen, welches dem kälteren der letzten Eiszeit anscheinend vorangegangen ist. Die Abschmelzung der Eisdecke bis auf den Rest der jetzigen Vergletscherung der Hochgebirge bedeutete jedenfalls eine erhebliche Entlastung der davon betroffenen Erdschollenteile. Diese erfuhren wegen der damit verbundenen Störung des Gleichgewichts eine säkulare, z. B. in Skandinavien noch fortdauernde Erhebung, während der Rückfluß des Schmelzwassers eine Auffüllung der Ozeane mit Vermehrung des Druckes auf deren Boden mit sich brachte. Damit aber mußten im Laufe langer Zeiträume gewaltige Küstenverschiebungen, also Änderungen der Gestalt der Festländer und Inseln verbunden sein, deren ursprüngliche Erhebung über den Meeresboden allerdings damit noch nicht erklärt ist. Auf die Ursache dieser für die Erdgeschichte bedeutungsvollen Erscheinung werden wir noch zurückkommen.

3. Erdballschichten

Die feste und flüssige Erdoberfläche erfährt durch die mit den Tages- und Jahreszeiten wechselnde und in der Lufthülle gedämpfte Sonnenstrahlung von 2 cal/cm^2 i. d. Min. im Mittel eine entsprechende Temperaturänderung, die sich auch in den Boden hinein erstreckt. In mittleren Breiten reichen die Tagesschwankungen auf dem Festland, und zwar fortschreitend verzögert, bis in eine Tiefe von etwa 1 m, die Jahresschwankungen bis zu 10 m, wobei auch die pflanzliche Bodenbedeckung, der Wassergehalt des Bodens, die Grundwasserströmung und die von Verdunstung begleitete Luftbewegung mitspielen. Feuchter Boden besitzt zwar vermöge der hohen spezifischen Wärme des Wassers eine größere Wärmeaufnahme, also Speicherfähigkeit, als trockener,

ist aber gleichzeitig ein besserer Wärmeleiter und läßt daher die Temperaturschwankungen tiefer eindringen. Daher kommt es, daß in höheren Breiten die Schicht der beständigen Temperatur mit gelegentlicher Unterschreitung des Gefrierpunktes, also Erstarrung der Bodenfeuchtigkeit zu Eis, tiefer liegt als am Äquator. Unterhalb dieser Schicht steigt die Temperatur nach Messungen in Bohrlöchern, die bis zu 2000 m hinabreichen, im Verhältnis von 1° auf 25 bis 50 m, im Mittel 35 m Tiefenzuwachs, woraus man wegen der Wärmeleitfähigkeit von rd. 1 cal/m^3 und Grad in der Stunde auf einen gleichförmigen Wärmestrom von etwa $^1/_{20000}$ cal/cm^2 i. d. Min. aus dem Erdinnern nach der Oberfläche schließen muß. Inwieweit dieser gegenüber der Sonnenerwärmung allerdings fast verschwindende Wärmestrom durch die von allen äußeren Einflüssen unabhängige Zersetzung radioaktiver Stoffe in der Erdrinde unterstützt wird, ist noch nicht hinreichend festgestellt. Jedenfalls haben wir beim Fortschreiten in Tiefen von etwa 100 km die Schmelztemperaturen der meisten Gesteine zu erwarten, so daß also die feste Erdkruste auf einer Flüssigkeit ruht, die in den Vulkanen in der Tat zeitweise an die Oberfläche tritt. Die schon erwähnte Reihenordnung der Vulkane deutet nun auf Spalten der festen Erdkruste hin, deren Zusammenhang damit unterbrochen scheint. Der sich aus dem spezifischen Gewicht und der Krustendicke berechnete Druck ergibt nämlich multipliziert mit der Großkreisfläche des Erdballs eine Gesamtkraft, die im Falle des Zusammenhangs von der Ringfläche der Erdkruste aufzunehmen wäre. Diese müßte dann eine einseitig tangentiale Druckspannung von 800 000 bis 900 000 kg/cm^2 aushalten, der kein bekannter fester Stoff gewachsen ist, während jeder Körper allseitige Drucke beliebiger Größe unabhängig vom Aggregatzustand ertragen kann. Daraus folgt einerseits, daß die Erdkruste mit der mittleren Dichte 2,8 g/cm^3 aus einzelnen Schollen besteht, die nur lose an den Spalten zusammenhängen und auf dem flüssigen Magma von der Dichte 3,3 g/cm^3 schwimmen, weiterhin aber, daß innerhalb der Schollen schon in mäßigen Tiefen von wenigen Kilometern ein allseitig gleicher, nur von der Tiefe abhängiger Druck herrscht.

Die Schollengrenze verläuft übrigens nicht überall, wie am Stillen Ozean den Festlandküsten parallel. Von Japan scheint sich ein westöstlicher Riß über Hawai, Mexiko, die Antillen und die Kanarischen Inseln mit einer Abzweigung nach Island bis zum Aetna und Vesuv zu erstrecken. Vielleicht hängt damit auch die malayische Vulkanspalte über den Demawend zusammen, die ihrerseits in den asiatischen Nordsüdriß einmündet. Die Küsten des Atlantischen Ozeans haben dagegen nichts mit der Schollenbegrenzung zu tun, womit auch der Anlaß zu dem von *A. Wegener* aus ihrem angenäherten Parallelverlauf vermuteten Gegeneinanderbewegung, die überdies durch geodätische Messungen nicht bestätigt wird, entfällt. Verläuft schließlich die Ober-

fläche der flüssigen Schicht als Gleichgewichtsfigur der äußeren durch die Meeresfläche gegebenen Erdgestalt parallel, so wird das mittlere Raumgewicht der festen darauf schwimmenden Schollenteile an jeder Stelle im verkehrten Verhältnis zu ihrer Gesamthöhe über der Flüssigkeit stehen. Auf den Hochebenen und Gebirgen der Erdteile haben wir demnach eine geringere Dichte der Erdkruste zu erwarten, wie unter den Ozeanen, was auch durch zahlreiche Schweremessungen bestätigt wurde. Diesem als Isostasie bezeichneten Gleichgewichtzustand haben sich nun die schwimmenden Krustenschollen dauernd anzupassen, wenn, wie früher geschildert, Massenverlagerungen an ihren Oberflächen stattfinden oder gar eine Schrumpfung der flüssigen Magmaschicht durch Abkühlung eintritt. Eine solche ist aber durch den schon erwähnten, wenn auch nur schwachen Wärmestrom nach der Oberfläche dann bedingt, wenn nicht der Verlust durch Radiumzerfall innerhalb der Kruste oder an deren Unterseite durch Erstarren von Magma ohne Temperaturänderung, aber unter Raumvergrößerung gedeckt wird, worüber wir allerdings nichts aussagen können. Der von allen äußeren Einwirkungen unabhängige Radiumzerfall äußert sich vorwiegend durch Umwandlung radiumhaltiger Uran- und Thorerze in Blei unter Abgabe von Helium und Freiwerden von erheblichen Energiebeträgen. Da man die Umwandlungsdauer aus physikalischen Messungen kennt, so gibt das Verhältnis des Bleigehaltes zum unveränderten Stoff ein Maß für dessen Alter seit der Erstarrung der sie enthaltenden Teile der Erdkruste, und zwar in Höhe von 1 bis 1,5 Milliarden Jahren. Der Temperaturanstieg nach dem Erdinnern wird durch diese Vorgänge keinesfalls betroffen und führt schon bei 200 km Tiefe auf 5000°, wobei alle bekannten Stoffe nicht mehr als Flüssigkeiten, sondern wegen Überschreitung der kritischen Temperatur nur noch als Gase bestehen können. Innerhalb dieses hochverdichteten Gaskerns findet alsdann unter dem Einfluß der Schwerkraft und der ihr entgegenwirkenden Strahlung noch eine bedeutende radiale Zunahme der Temperatur und des Druckes statt, der im Mittelpunkt bis zu $2 \cdot 10^7$ kg/cm^2 ansteigen dürfte. Mit dem Temperaturanstieg ist aber nach der Gastheorie ein solcher der Zähigkeit verbunden, der nach Versuchen von *Bridgeman* bei hohen Drucken eine Verfestigung vortäuscht. Es ist deshalb auch nicht möglich, aus der hohen Dichte des Erdkerns auf einen festen Zustand und weiter auf eine Zusammensetzung aus Nickeleisen und anderen Schwermetallen zu schließen, wie es häufig unter der Bezeichnung als Nife (Nickel-Ferrum) für den Erdkern in geologischen und geophysikalischen Schriften geschieht, in denen dann auch, um den festen Zustand zu rechtfertigen, im Kern nur Temperaturen von 5000 bis 6000° angenommen werden. Die bis dicht an die Oberfläche tretenden nutzbaren Erz- und Metallgänge sind vielmehr als reine oder nachträglich umgewandelte Niederschläge von aus dem

Erdinnern aufsteigenden Gasen aufzufassen. Beachtet man ferner, daß die seismographisch gemessene mittlere Geschwindigkeit der Erdbebenwellen von rd. 12 000 m/s durch den Erdkern wie diejenige der Verdichtungswellen des Schalles in Gasen mit der Wurzel aus der Temperatur zunimmt, so gelangt man auf ein Verhältnis der absoluten Temperaturen gegenüber der Außenluft von über dem Tausendfachen, also erhält absolute Mitteltemperaturen im Erdkern von 200 000 bis 300 000°. Die hohe Erdbebengeschwindigkeit führt andererseits aber auch auf einen Elastizitätsmodul von $8 \cdot 10\,kg/cm^2$ also das vierfache des Stahls mit der Schallgeschwindigkeit von 5000 m/s und ist somit ein Beleg für die den Stahl weit übertreffende Starrheit oder Righeit des Erdkerns, die eben durch das schon erwähnte Ansteigen der Zähigkeit mit der Wurzel aus der Temperatur bedingt wird.

Zusammenfassend dürfen wir demnach den Erdball aus drei Hauptteilen bestehend ansehen: Zunächst aus dem unter hohem Druck und entsprechend hoher Temperatur wahrscheinlich völlig ionisierten und daher homogen zusammengesetzten sehr dichten Gaskern, an dessen äußeren und daher kühleren Schichten schon die chemischen Elemente ausgeschieden und zu Verbindungen, insbesondere Silikaten zusammengetreten sind. Diese gehen dann mit nach außen stetig abnehmender Temperatur allmählich in eine Flüssigkeitsschicht von rd. 100 km Dicke, das sog. Magma über, auf dem schließlich die feste Gesteinshülle von etwa 80 bis 100 km Dicke schwimmt, die in nur lose zusammenhängende Schollen zerfällt. In deren Vertiefungen lagert das Meer und über dem Ganzen die Lufthülle mit einer nach außen bis zum Verschwinden abnehmenden Dichte und Temperatur. Im Innern aller dieser Schichten herrscht allseitig gleicher Druck, also keine Schubspannung, so daß sich der ganze Erdball im Gleichgewicht wie eine ideale Flüssigkeitsmasse mit nach außen abnehmender Dichte verhält, deren Zähigkeit erst beim Auftreten formändernder Kräfte in Erscheinung tritt.

4. Der Erdball als Weltkörper

Betrachten wir die Erde als Weltkörper, so dürfen wir nicht übersehen, daß sie mit dem Monde zusammen derart die Sonne in einem Jahr von 365,25 Sterntagen $= 31{,}6 \cdot 10^6$ s umkreist, daß der gemeinsame Schwerpunkt eine Ellipse von der geringen Exzentrizität 0,0167 beschreibt, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht. Deren Masse beträgt etwa $2 \cdot 10^{33}$ gr oder 332 000 Erdmassen, während der Mond nur 1 : 81 der Erdmasse von $6{,}15 \cdot 10^{27}$ gr besitzt. Die nahezu kreisförmige Erdbewegung um die Sonne wird objektiv durch die scheinbare Bewegung aller Fixsterne infolge der endlichen Lichtgeschwindigkeit, die sog. Aberration bestätigt. Danach vollziehen die Sterne in der Nähe

der Ekliptik im Jahre kleine ihr parallele Schwingungen mit dem größten Ausschlage von 20,5″, im Pole der Ekliptik Kreise vom gleichen Halbmesser und dazwischen Ellipsen von derselben der Ekliptik parallelen großen Halbachsen. Die mittlere Sonnenentfernung ist $149{,}5 \cdot 10^6$ km, die des Mondes von der Erde 384 000 km, so daß der gemeinsame Schwerpunkt von Erde und Mond etwa 4750 km von der Erdmitte nach dem Monde zu liegt. Um diesen noch innerhalb der Erde liegenden Schwerpunkt kreist sowohl der Mond als auch die Erde in je einer Ellipsenbahn von der Exzentrizität 0,055 und einer Neigung von 5° 8,5″ der Bahnebene gegen die gemeinsame Schwerpunktsbahnebene, die sog. Ekliptik, um die Sonne. Alle drei Körper vollziehen Achsendrehungen, und zwar die Sonne in 24,65 Tagen mit einer Äquatorneigung von 7° 10″, die Erde in 1 Tag mit der Neigung von 23° 27″ und der Mond mit der Erde um den gemeinsamen Schwerpunkt in 27,32 Tagen und einer Äquatorneigung des ersteren von 6° 41″ gegen die Ekliptik. Diese Achsendrehungen haben weiter Abplattungen zur Folge, von denen die der Erde, wie wir schon sahen, 1 : 296 und die des Mondes wegen der langen Umdrehungsdauer nur 1 : 60 000 beträgt, während diejenige der Sonne aus dem gleichen Grunde und wegen ihrer vorwiegenden Massenanhäufung im Innern unmerklich ist.

Als abgeplatteter Umdrehungskörper hat aber die Erde die Eigenschaften eines Kreisels, auf dessen Äquatorwulst von Sonne, Mond und den übrigen die Sonne umkreisenden Planeten Kräfte wirken, welche die Erdachse senkrecht zur Bahnebene zu stellen, den Kreisel also aufzurichten suchen. Diesem Bestreben weicht die Erdachse durch eine kegelförmige Bewegung, die sog. P r ä z e s s i o n aus, welche infolge der Zusammenwirkung von Sonne und Mond eine Umlaufsdauer von 25 400 Jahren besitzt. In dieser Zeit beschreibt der Himmelspol, der zur Zeit nahe dem sog. Polarstern im Sternbilde des kleinen Bären liegt, einen Kreis um den Pol der Ekliptik, auf der gleichzeitig die Schnittpunkte mit dem Himmeläquator, die Tag- und Nachtgleichenpunkte herumwandern. Darüber lagert sich noch eine kleine Schwankung, die sog. N u t a t i o n von höchstens 9½ m, am Pol gemessen, infolge der Abweichungen der Mondbahn von der Ekliptik, deren Schnittpunkte, die Mondknoten in 18,6 Jahren umlaufen, ein Vorgang, der ebenfalls als Präzession der Mond-Erdgruppe durch die Sonnenwirkung aufgefaßt und berechnet werden kann.

Die Wirkung der übrigen Planeten, insbesondere des Jupiter mit mehr als 300, die des Saturn mit etwa 100 Erdmassen in allerdings gegenüber Mond und Sonne erheblich größeren und wegen der Relativbewegung stark veränderlichen Abständen auf den Äquatorwulst bedingt eine Schwankung der Äquatorneigung oder Schiefe der Ekliptik von jetzt 23,45° zwischen 22° und 25° mit einer Periode von etwa 40 000 Jahren, während ihre Störungskräfte auf die Erdbahn selbst eine

Schwankung der Exzentrizität mit dem Gegenwartswert von 0,0167 zwischen 0,0033 und 0,078 in 92000 Jahren und schließlich einen Umlauf des Perihels oder der sog. Apsidenlinie in 20700 Jahren zur Folge haben.

Es fragt sich nun, ob diese Schwankungen und Kräfte sich auch an der Erdoberfläche geltend machen. Am ehesten sind solche Wirkungen, und zwar mechanischer Art an den beweglichen Bestandteilen der Erdoberfläche, also der Wasserbedeckung zu erwarten, während sie in der Lufthülle durch deren ohnehin starke Bewegung der unteren Schichten (Troposphäre) völlig überdeckt werden. Daher kommt es auch, daß der im Volksglauben tief verwurzelte Einfluß der Mondphasen auf das Wetter wissenschaftlich noch nicht nachgewiesen werden konnte. Dagegen tritt die Anziehung von Sonne und Mond in den Gezeiten, d.i. Ebbe und Flut, deutlich zutage. Sie beruht auf der Tatsache, daß auf einer gleichmäßig von Wasser bedeckten Erde die Wasserhülle in der Richtung des anziehenden Außenkörpers eine Erhebung, also eine ellipsoide Abweichung von der Kugelgestalt annehmen würde, die wegen der Erdumdrehung als halbtägige Flutwelle über deren Oberfläche wandert. Wenn diese Erhebung im offenen Meere statisch auch nur etwa 0,8 m beträgt, so kann sie doch durch Zusammendrängung des Schwalles in schmalen Meeresarmen, z. B. dem Kanal zwischen Frankreich und England, sowie in sich verengenden Buchten zu Höhen von vielen Metern ansteigen. Im gleichen Sinne, bis zur Springflut, wirkt auch das Zusammenwirken von Sonne und Mond bei Neu- und Vollmond (Konjunktion und Opposition), während bei Halbmond eine gegenseitige Abschwächung eintritt. Die Brandung der Flutwelle an den Küsten ist nun mit einer teilweisen Vernichtung der Hubarbeit des Wassers durch hydrauliche Widerstände verknüpft, die sich im ganzen als Bremswirkung am Erdball geltend macht und dessen Umdrehungswucht schwächt. Es handelt sich dabei um eine Bremsleistung von etwa 2,3 Milliarden PS, die eine Verminderung der Winkelgeschwindigkeit der Erde, also eine Verlängerung des Tages um rd. $^{1}/_{1000}$ s im Jahrhundert, und daher eine Verlängerung des Jahrhunderts selbst in dieser Zeit um rd. 37 s zur Folge hat. Das an der Erde wirkende Bremsmoment bedingt ferner nach dem Wechselwirkungssatz der Mechanik ein entgegengesetzt wirkendes Drehmoment auf die Erd-Mond-Gruppe, durch das der letztere eine wenn auch nur geringe Beschleunigung erfährt, welche neuerdings durch Vergleich alter und neuer Verfinsterungen nachgewiesen werden konnte und vermöge der erhöhten Fliehkraft eine entsprechende säkulare Vergrößerung des Mondabstandes bedingt. Gegenüber der oben ermittelten Bremsleistung treten alle Energiebeträge weit zurück, die wir durch hydraulische und Wärmekraftmaschinen an der Erdoberfläche zur Zeit gewinnen, so daß es

nahe liegt, einen Teil der so verlorenen Flutenergie in mächtigen Wasserkraftanlagen (Gezeitenkraftwerke) an den durch die Fluthöhe hierfür besonders geeigneten Küsten nutzbar zu machen, was bisher nur am Kostenaufwand gescheitert ist. Die Verlängerung des Tages, also unseres Zeitmaßstabes, wird sich vielleicht durch die neuerdings entwickelten, äußerst genauen Quarzuhren noch schärfer bestimmen und damit auch die Frage entscheiden lassen, ob der Erdball noch einer Schrumpfung unterliegt, die umgekehrt wegen der Verringerung des Trägheitsmomentes bei unverändertem Drall auf eine Erhöhung der Winkelgeschwindigkeit, d. h. eine Tagesverkürzung, führen müßte, welche die oben ermittelte Verlängerung durch die Flutwirkung teilweise ausgleicht. Die Flutwirkung von Sonne und Mond muß sich aber auch am Erdkörper bzw. der Erdkruste selbst zeigen, wenn diese nicht vollkommen starr, sondern elastisch nachgiebig ist. In der Tat sind derartige, allerdings sehr kleine Formänderungen von 1 bis 2 cm in der Lotrichtung neuerdings nachgewiesen worden. Die Elastizität des Erdballes bedingt aber noch eine Vergrößerung der Eigenschwingungsdauer der Erdachse um ihre Mittellage, die für den starren Kreisel bei einer Abplattung von 1 : 296 rd. 305 Tagen betragen würde, während sie aus den verschlungenen Bahnen der Polverschiebung von etwa 0,4″ entsprechend 9 m Ausschlag zu 434 Tage ermittelt würde. Aus diesem Periodenzuwachs hat man den sog. Schub- oder Gleitmodul des Erdballs und der Erdkruste bestimmt und in guter Übereinstimmung mit den aus der Erdbebenwellengeschwindigkeit gefolgerten gefunden. Danach vollzieht die Erde wie ein sehr harter elastischer Körper unter der Wirkung rasch, d. h. etwa täglich bis jährlich, wechselnden Außenkräften kleine elastische Schwingungen, während sie vermöge des Wegfalls von Schubspannungen im Ruhezustand langsam, d. h. durch Jahrtausende wirkenden Kräfte gegenüber sich wie eine Flüssigkeit verhält und darum auch ihre Gestalt der jeweiligen Umdrehungsdauer anpaßt.

Neben diesen mechanischen Wirkungen unterliegt die Erde auch *thermischen* Schwankungen durch die ungleichmäßige Sonnenbestrahlung. Diese ist naturgemäß am stärksten in der Sonnennähe im sog. Perihel, das in der Jetztzeit etwa in den Winter der Nordhalbkugel fällt und diesen mildert, unter Abschwächung der Sommerhitze in der Erdferne, dem Aphel. Die Nordhalbkugel erfreut sich also in der Gegenwart durch die Bahnexzentrizität eines Temperaturausgleiches, dem auf der Südhalbkugel eine, durch die überwiegende Wasserbedeckung allerdings gemilderte Verschärfung des Unterschiedes der Sommer- und Wintertemperatur gegenübersteht. Da nun, wie wir gesehen haben, das Perihel in 20 700 Jahren in der Bahnrichtung umläuft, während die Erdachse in 25 400 Jahren einen Kegel in entgegengesetzter Richtung beschreibt, so wird der gegenwärtige

Zusammenfall des Perihels mit dem Winter sich nach etwa 12 000 Jahren wiederholen.

Viel wichtiger erscheinen hingegen die Schwankungen der Erdbahnexzentrizität, durch welche die gegenwärtige halbjährige Änderung des mittleren Sonnenabstandes von $149{,}5 \cdot 10^6$ km um $\pm 5 \cdot 10^6$ km in einer Periode von 92 000 Jahren zwischen $\pm 5 \cdot 10^5$ km und $\pm 11{,}7 \cdot 10^6$ km schwankt. Das bedingt aber, daß in derselben Periode die jetzt etwa 3,3 % im Jahr betragende Strahlungsschwankung in rd. 22 000 Jahren auf 0,7 % absinkt und in 70 000 Jahren bis auf 15,6 % wieder ansteigt, womit dann entsprechende jährliche Temperaturunterschiede auf der Erdoberfläche verbunden sind, welche die durch die Stellung der Erdachse zur Sonne gegebenen Jahreszeiten stark beeinflussen. Am stärksten werden sich diese Unterschiede auf das Klima dann auswirken, wenn die Erdachse in der Sonnennähe oder Sonnenferne nach der Sonne zu geneigt ist, wozu noch der Einfluß dieser zwischen 22° und 25° in 40 000 Jahren hin und herschwankenden Schiefe der Ekliptik tritt. Faßt man alle diese Wirkungen zusammen, so erhält man nach *Milankovic* merkliche Klimaschwankungen innerhalb von 25 000 Jahren, also ungefähr in der Periode der Präzession, die nur wenig von der Umlaufszeit des Perihels abweicht. Ganz besonders starke Änderungen dagegen, d. h. Übergänge vom subtropischen Klima in unseren Breiten zu sog. Eiszeiten in einer großen Periode von etwa 100 000 Jahren, d. i. der Summe der Periode der Erdexzentrizität von 92 000 Jahren und der Wiederholung der gleichen Einstellung der Erdachse im Perihel in 12 000 Jahren. Mit dieser kosmischen Aufklärung der Klimaschwankungen erledigen sich auch die Hypothesen über weit ausgedehnte Polwanderungen über die Erdoberfläche, die sich überdies in keiner Weise dynamisch begründen lassen.

Der Erdball verhält sich überdies, wie aus den Neigungen der Magnetnadel gegen den Meridian und Horizont hervorgeht, wie ein großer Magnet, dessen Achse aber nicht mit seiner Drehachse zusammenfällt, so daß die beiden Magnetpole um etwa 20° von den Drehpolen abweichen, außerdem aber täglich eine fast elliptische Bahn mit den Auslenkungen 6 bis 11 km um die Mittellage durchlaufen. Der Ursprung und Sitz des Erdmagnetismus, der vielleicht mit der in der Lufthülle nach oben stark zunehmenden elektrischen Ladung zusammenhängt, ist noch ungeklärt. Indessen scheint nach den Schwankungen des Erdfeldes mit der Periode der nachweislich magnetischen Sonnenflecken eine Beziehung zu dem etwa 100 mal stärkeren Magnetfelde der Sonne durch einen von dieser ausgehenden Elektronenstrom vorzuliegen, der nach Störmer die mit heftigen Bewegungen der Magnetnadel verbundenen Polarlichter hervorruft.

Schließlich unterliegt die der Erdbewegung zugewandte Hälfte der Erdoberfläche dauernd einem Hagel von kleineren oder größeren Welt-

körpern, welche vermutlich teilweise einer das ganze Sonnensystem erfüllenden Staubwolke entstammen oder als Reste von Kometen die Sonne umkreisend, in den Anziehungsbereich der Erde geraten. Der größte Teil dieser Körper wird beim Eindringen in die Lufthülle mit Geschwindigkeiten von 80 bis 100 km/s durch die Widerstandsenergie bis zur Weißglut erhitzt, verdampft und tritt für uns nur als sog. Sternschnuppen in Erscheinung. Größere Massen, und zwar sowohl Stein-, wie Eisen-Nickel-Meteoriten von einigen Kilogramm bis zu Tausenden von Tonnen Gewicht gelangen dagegen nur oberflächlich erhitzt bis auf die Erdoberfläche und können dort erhebliche Zerstörung, ja sogar Kraterbildungen von mehreren km Durchmesser wie in Kalifornien, Arizona, Südafrika und neuerdings in Sibirien beobachtet, hervorrufen. Von derartigen Gebilden offenbar gleichen Ursprungs ist ersichtlich die ganze Mondoberfläche bedeckt, die ohne Luft- und Wasserhülle keiner Verwitterung unterliegt, der die meisten Meteorkrater auf der Erde, soweit sie nicht schon im Ozean verschwinden, bald zum Opfer fallen. Bemerkenswert ist jedenfalls die Tatsache, daß die Steinmeteore sich nach ihrem Aufbau und Raumgewicht gut an die Gesteine und Laven der Erdkruste anschließen, während die Nickel-Eisen-Meteore nicht nur aus gediegenem Metall, sondern auch aus Oxyden, Karbonaten und Schwefelverbindungen, also Erzen, bestehen. Beide Arten von Meteoren enthalten überdies beträchtliche Gaseinschlüsse, und zwar Kohlensäure, Kohlenoxyd, Wasserstoff und Methan nebst Spuren von Helium, nicht aber Sauerstoff, aus denen man auf einen gegenüber der Erdoberfläche erheblich größeren Zeitverlauf seit ihrer Erstarrung von etwa $4 \ldots 5 \cdot 10^9$ Jahren schließen kann.

5. Ursprung der Erde und des Mondes

Die Entstehung der Erde und des Mondes hängt aufs engste mit derjenigen des ganzen Planetensystems zusammen, für die eine größere Anzahl von Theorien aufgestellt wurden, die in drei Gruppen zerfallen. Die erste, auf *Kant* zurückgehende, sieht örtliche Zusammenballungen infolge der Schwerewirkung in einem noch ungestalteten Urnebel vor, die aber niemals zu der im Sonnensystem vorherrschenden gleichsinnigen Eigendrehung und Umlaufsbewegung führen können. In der von *Moulton, Chamberlin* und *Jeans* vertretenen zweiten Gruppe soll die Drehung eines schon durch Schwerewirkung gebildeten Zentralkörpers durch das Vorbeistreichen eines anderen Fixsterns unter gegenseitiger Flutwirkung erzwungen werden, während die Begleiter aus örtlichen Zusammenballungen in den aus beiden Körpern herausgezogenen Gasmassen in verschiedenen Abständen hervorgehen. Dieser im einzelnen rechnerisch nicht prüfbare Vorgang kann aber infolge der enormen

jetzigen Abstände der Fixsterne voneinander auch unter der Annahme ihrer regellosen Bewegung wie die der Moleküle in einem Gas nur in Zeitabständen von vielen Billionen von Jahren, die von der Größenordnung der Lebens- bzw. Leuchtdauer der Sterne selbst sind, erfolgen und ist daher äußerst unwahrscheinlich. Die darin liegende Seltenheit der Abtrennung von Begleitern von einem Zentralstern bzw. einer Aufteilung desselben ist indessen kaum vereinbar mit der Häufigkeit von Doppel- und mehrfachen Sternen, während sich eigentliche Planetensysteme mit dunkeln Begleitern von Fixsternen der Beobachtung entziehen.

Die bei allen einfachen und mehrfachen Fixsternen sowie deren Anhäufungen im Weltall beobachtete Drehbewegung läßt diese vielmehr als eine allgemeine Eigenschaft der Himmelskörper neben der Fortbewegung erscheinen, worauf sich denn auch die dritte von *Laplace* gegründete Gruppe von Theorien der aufeinander folgenden Abschleuderung der Begleiter von einem sich zusammenziehenden Zentralkörper mit schon vorhandener Eigendrehung gründet. Der infolge der Schwere im Innern stark verdichtete gasförmige Zentralkörper hat im Zustand der Abschleuderung eine große Abplattung und eine scharfe Äquatorkante, deren Umfangsgeschwindigkeit und Halbmesser bei der Abschleuderung dem dritten Kepplerschen Gesetz genügen. Dieser Umstand sowie die Erhaltung des Momentes der Bewegungsgröße, auch Drall genannt, ermöglicht eine rechnerische Prüfung der Abschleuderungstheorien im Gegensatz zu den beiden oben erwähnten Gruppen. Der von *Laplace* zunächst ins Auge gefaßte Fall der Trennung der Begleiter in den jetzigen Abständen, bis zu denen sich alsdann der Äquator des Zentralkörpers erstreckt haben muß, ist wegen der daraus folgenden Abmessungen der Ursonne von 6400 jetzigen Sonnenradien oder 4,5 Milliarden km, für die in der Fixsternwelt kein Beispiel besteht, äußerst unwahrscheinlich. Er scheidet aber auch aus wegen der damit verbundenen Zunahme der Drehwucht von der Trennung bis zur Gegenwart, für die keine Energiequelle zur Verfügung steht. Der entgegengesetzte Fall der Abschleuderung vom jetzigen Äquator des Zentralkörpers bedingt eine sich bei jeder Trennung wiederholende starke Massenverschiebung in dessen Innern und läßt den Übergang der an derselben Stelle abgeschleuderten Begleiter in die derzeitigen, von ihren Massen unabhängigen Abstände unerklärt. Fordert man dagegen im dritten Fall eine homogene Formänderung des Zentralkörpers, so erhält man viel kleinere Abschleuderungsradien als der jetzige Äquatorhalbmesser, also die Notwendigkeit einer wiederholten explosionsartigen Ausdehnung des Zentralkörpers nach der Trennung, die allen kosmischen Beobachtungen, insbesondere der Schrumpfung eines Riesensterns und den explosionsartigen Übergang in einen weißen Zwergstern widerspricht. Es bleibt also nur noch als letzter Fall der

Verzicht auf eine homogene Formänderung und die Forderung der Erhaltung der Drehwucht, die nach der ersten Abschleuderung infolge der Flutwirkung der selbständig gewordenen Begleiter auf die äußerst verdünnte Gashülle des Zentralkörpers nur unwesentliche Änderung erfährt. Danach hatte die Sonne vor der ersten Abschleuderung etwa den 800fachen Halbmesser von rd. $56 \cdot 10^7$ km und eine Umdrehungsdauer von etwa 7 Jahren, also innerhalb der Jupiterbahn, und verlor bei ihrer inhomogenen Schrumpfung vom 736-, 702-, 676-, 553fachen des jetzigen Halbmessers von rd. 700000 km der Reihe nach die großen Planeten Neptun, Uranus, Saturn und Jupiter, deren jetziger Drall den der Sonne weitaus überwiegt. Alsdann folgte eine stetige Schrumpfung bis zum 42fachen Halbmesser, worauf in kürzeren Abständen bis zum 36fachen die mit nur kleinen Drallwerten behafteten Planetoiden und inneren Planeten nacheinander abflogen, nachdem die äußeren großen sich ihren jetzigen Bahnen infolge der Rückwirkung der Flutmomente schon weitgehend genähert hatten.

Für die Erd- und Mondmasse erhalten wir so einen ursprünglichen Bahnhalbmesser von $29 \cdot 10^6$ km = 41,1 jetzigen Sonnenradien und eine mit der damaligen Sonnenrotation übereinstimmende Eigendrehung von etwa 30 Tagen. Diese hat der nahezu gleichzeitig mit der Erde, aber selbständig abgeschleuderte Mond, der als Gaskugel mit einem Halbmesser von rd. 5500 km geboren wurde, unter der Flutwirkung der benachbarten Erde fast völlig beibehalten. Bei der Abschleuderung von der Sonne hatte der noch ganz gasförmige Erdball einen Halbmesser von höchstens 50000 km, erfuhr also bis zu seinen heutigen Abmessungen eine stetige Schrumpfung unter gleichzeitiger Abnahme der Umdrehungsdauer auf einen Sterntag. Eine erst nach der Trennung von der Sonne erfolgte Abschleuderung des Erdmondes erweist sich als mechanisch unmöglich, da sie nur bei einem Erdhalbmesser von rd. 120000 km statthaben konnte, also eine Ausdehnung der Gesamtmasse zwischen den beiden Vorgängen unter gleichzeitiger Abnahme der Umdrehungszeit von 30 auf 5 Tage führen würde. Erde und Mond sind also selbständige, nur durch ihre Nähe aneinander gekettete Planeten, die auch jetzt in ihren Absolutbahnen nur um $\pm {}^1/_{400}$ des Sonnenabstandes und um ± 1 km/s von der mittleren Geschwindigkeit von 30 km/s voneinander abweichen.

Die scheinbar im Widerspruch mit der Abschleuderung stehende Äquatorneigung der Erde gegen ihre Bahnebene um 23,5° findet ihre zwanglose Erklärung im Drallausgleich mit der Neigung der Mondbahn um 5,12° und führt auf ein auch anderweitig bestätigtes Drallverhältnis beider Körper von 1 : 4,43. Daraus wiederum berechnet sich ein Trägheitshalbmesser des Erdballs von 0,61 und ein Radius der gleichwertigen homogenen Vollkugel von 0,96 des Erdhalbmessers mit einem Verhältnis der zentralen zur mittleren Dichte von 1,17 oder einer Zen-

traldichte von 6,46 g/cm^3, die ungefähr das Doppelte der festen und flüssigen Erdhüllendichte beträgt. Da nun die Temperatur in einer Tiefe von 200 km, also unter der Magmaschicht, etwa 5000° erreicht und damit die kritische aller bekannten Stoffe übertrifft, so müssen wir einen gasförmigen Erdkern annehmen. In diesem steigert sich die Temperatur weiter nach dem Polytropengesetz des Kerngases auf etwa 900 000° im Zentrum bei einem Druck von rd. 20 Millionen kg/cm^2. In diesem Zustand verhält sich das Erdinnere vermöge der mit der Temperatur und dem Druck enorm ansteigenden Zähigkeit nahezu wie ein fester Körper, was durch neuere Ergebnisse von *Bridgeman* bestätigt wurde.

6. Die Entwicklung des Erdballs

Für die weitere Entwicklung des ursprünglich gasförmigen Erdballs ist nun seine Geburt aus den äußeren Sonnenschichten maßgebend, in denen nach Ausweis der Sonnen- und Fixsternspektren schon der größte Teil der chemischen Elemente in Atomform besteht, während der viel höher temperierte Sonnenkern wohl nur noch nicht aneinander gekettete Protonen, Neutronen und Elektronen beider Art enthält, aus deren gelegentlichem Zusammentreffen unter Massevernichtung dann die Strahlung hervorgeht. Ein erheblicher Teil der Elemente wird indessen noch im ionisierten Zustande, d. h. ganz oder teilweise der Elektronenhüllen beraubt aus der Sonne in den Erdball übertreten und sich in dessen dichterem Kern anhäufen, während die Erdhülle und der Mond schon aus Vollelementen bestehen. Die mit der Schrumpfung verbundene Steigerung der absoluten Temperatur, die bei homogener Formänderung entsprechend dem Gleichgewichtszustande im umgekehrten Verhältnis des Körperhalbmessers bei der mit der Abtrennung verbundenen stärkeren zentralen Verdichtung dagegen rascher wächst, erstreckt sich demgemäß auch vorwiegend auf den Kern der Gaskugel, während die Hülle einer Abkühlung unterliegt und zu Wolkenbildungen neigt, wie wir sie in den Sonnenflecken mit einer gegenüber ihrer Umgebung etwa 2000° niedereren Temperatur beobachten. In viel höherem Maße und noch rascher werden sich solche Verdichtungen in der Hülle des massenärmeren Erdballs einstellen und schließlich zu einer wenn auch noch heißen Flüssigkeitsschicht führen, die den dichteren Gaskern von der aus leichteren Elementen, vorwiegend Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff bestehenden Lufthülle trennt. Diese Trennung vollzieht sich natürlich nicht stetig, sondern ist, wie wir es an der Sonne beobachten, von heftigen Wallungen begleitet und häufiger von gewaltigen Sonne- und Mondfluten mit Ausbrüchen aus dem Erdkern gestört. Das führt aber auf eine Durcheinandermischung innerhalb der Flüssigkeitsschicht unter Bildung von Legierungen und Karbiden sowie auf eine Absorption von Gasen aus

dem Innern und der Lufthülle, aus der schon Verbindungen, z. B. Kohlenwasserstoffe, hervorgehen können. Innerhalb der Flüssigkeitsschicht werden sich die einzelnen Stoffe im allgemeinen nach ihrer Dichte ordnen, also von außen nach innen in der Reihenfolge Na Mg Al Si Ca Fe Ni. In diesen Lagen werden sie durch den eindringenden Sauerstoff wie in der Bessemerbirne oxydiert bzw. nach der Bildung von SiO_2 zu Silikaten mit hohen Schmelzpunkten verschlackt. Erst nachdem die Abkühlung auf der Außenseite die Schmelztemperatur unterschritten hat, findet dort eine teilweise Verfestigung, also Krustenbildung der sog. Sialschicht in Form von Schollen statt, die auf dem schweren, noch flüssigen Sima schwimmen, das seinerseits stetig in den noch völlig durchmischten Gaskern bei dessen kritischer Temperatur übergeht. Dabei erstarrt an der Oberfläche die nicht an Metalle gebundene restliche Kieselsäure zu Quarzkristallen, die z. T. später zerrieben und zu Sandsteingebirgen zusammengedrückt einen mächtigen Bestandteil der äußeren Erdkruste bilden. Die häufig angenommene Verflüssigung oder gar Erstarrung des Erdkerns infolge des Absinkens von Schwermetallen wie Fe Ni ist abzulehnen, da die hierbei geleistete Arbeit der Schwere wieder in Wärme übergehen müßte, welche die Verflüssigung oder Verfestigung verhindert.

Auf der Außenseite der teilweise verkrusteten Flüssigkeitsschicht schreitet demgegenüber die Abkühlung durch den Strahlungsverlust fort, bis die Dissoziationstemperatur des Wasserdampfes erreicht ist. Alsdann beginnt die Verbrennung des in der Lufthülle vorhandenen H mit O zu überhitztem Wasserdampf, der z. T. von den Oberflächenbestandteilen der flüssigen Schicht unter Hydratbildung aufgenommen wird, während der Rest noch als Dampf die Gashülle sättigt. Dazu kommt weiter die Verbrennung des C aus den Karbiden und Kohlenwasserstoffen an der Flüssigkeitsoberfläche zu Kohlensäure, die dort Karbonate und als Gasrest einen ebenfalls beträchtlichen Anteil der Lufthülle bildet. Diese Vorgänge finden wahrscheinlich in der Nachbarschaft des chemischen Gleichgewichts der Verbrennungsprodukte mit ihren Bestandteilen wie in Gaserzeugern statt, so daß die freigewordene Verbrennungswärme die fortschreitende Abkühlung der Gashülle wohl verzögert, aber nicht aufzuhalten imstande ist. Das trifft in noch höherem Maße zu für die Entstehung von Stickstoffverbindungen, z. B. des NH_3, die infolge der chemischen Trägheit von N eine Wärmezufuhr unter relativ hohen Drücken und Temperaturen erfordert, wovon die neuzeitliche Stickstoffindustrie umfassenden Gebrauch macht. Solche Drücke stehen aber in der Lufthülle mit ihrem anfänglich enormen Wasserdampfgehalt so lange zur Verfügung, als ihre Temperatur noch über dem kritischen bzw. dem zugehörigen Siedepunkt liegt. Erst nach dessen Unterschreitung infolge der stetigen Wärmeausstrahlung in den Raum beginnt der Niederschlag des

Wassers und seine Ansammlung in den Vertiefungen der alsdann schon erstarrten, wenn auch noch warmen Erdkrustenoberfläche. Damit aber ist das vorgeologische Zeitalter der Erdentwicklung abgeschlossen und die Bedingung für die Entstehung und Erhaltung von Organismen aus den vorhandenen Stickstoffverbindungen und dem noch hohen Wasserdampf und Kohlensäuregehalt der Lufthülle gegeben, deren freier Sauerstoff nur mehr als Rest der geschilderten Verbrennungsvorgänge übriggeblieben ist. Der Wasserstoff ist als solcher ganz aus der Lufthülle verschwunden, während das Wasser ein verhältnismäßig spätes Erzeugnis der Erdentwicklung darstellt und schon vermöge seines hohen Molekulargewichtes gar keine Gelegenheit hat, etwa in den Weltraum zu entweichen und dort zu Eis zu erstarren, womit sich die Grundhypothese der in Laienkreisen verbreiteten sogen. Welteislehre (Glacialkosmogonie) erledigt.

Die Entwicklung des Mondes verläuft ganz ähnlich wie die des Erdkörpers durch Schrumpfung des ursprünglichen Gasballes und oberflächliche Abkühlung bis zur Bildung einer Flüssigkeitsschicht und deren endlicher äußerer Verkrustung. Mit ihrer geringeren Masse und kleinerem Rauminhalt entstammt die Mondkugel einer weiter nach außen gelegenen und daher leichteren Sonnenschicht, als der Erdball und dürfte daher kaum Schwermetalle enthalten, womit sich die geringe mittlere Monddichte erklärt. Die nach der Krustenbildung als Verbrennungsrest noch übrig gebliebene Lufthülle konnte bei der noch hohen Oberflächentemperatur vermöge der kleinen Schwerebeschleunigung von 1,6 m/s² und der entsprechenden Entweichungsgeschwindigkeit von 2,4 m/s gegenüber 11,2 m/s auf der Erde vom Monde nicht festgehalten werden, sondern wurde ihm noch vor der völligen Erkaltung von der Erde entrissen. Darum gibt es auf dem Monde auch weder Wasser noch Eis, da die jetzige Oberflächentemperatur der etwa 14 Tage beleuchteten Hälfte zeitweilig weit über dem Siedepunkt des Wassers liegen muß, während auf der anderen dunklen Hälfte die Weltraumkälte herrscht. In der Tat beobachtet man an der Mondoberfläche insbesondere an der überaus scharfen Schattengrenze keine Spur von Strahlenbrechung oder gar Wolkenbildung, womit auch die Möglichkeit der Entstehung und Erhaltung organischer Gebilde auf diesem toten Begleiter der Erde entfällt.

7. Organische Einflüsse und Ausblick

Alle Organismen, mögen sie nun dem Pflanzen- oder Tierreich angehören, bestehen aus Zellen und gehen auch durch Verschmelzung, Teilung, Wachstum und Anlagerung aus je einer oder zwei Einzelzellen hervor. Die Entstehung des Lebens auf der Erde ist demnach mit der Bildung der ersten Zellen aufs engste verknüpft und schwebt mit

dieser vorläufig noch ganz im Dunkeln. Wir wissen nur so viel, daß jede, wenn auch nur mikroskopisch kleine Zelle in ihrer halb durchlässigen Hülle eine kolloidale Flüssigkeit (das sogen. Protoplasma) enthält, in der also neben einem Kern eine sehr große Zahl sehr kleiner und doch hoch molekularer Eiweißkörper mit einer verhältnismäßig bedeutenden Gesamtoberfläche schwimmen, wodurch merkliche Energieumsätze auf Grund minimaler Druck-, Temperatur- und elektrischer Spannungsunterschiede ermöglicht werden. Diese führen dann zu einem Massenaustausch durch die Zellwand, d. h. zum Stoffwechsel durch Atmung, Nahrungsaufnahme und Abscheidung. Auf diesen an und für sich schon verwickelten physikalisch-chemischen Vorgängen an dem wegen des Molekülreichtums des Zellinhaltes stark labilen Gebilde beruht das ganze organische Leben, dem ohne zerstörende äußere Einflüsse keine Grenze gesetzt ist. Die einfache Zelle ist demnach unter den für ihr Leben notwendigen Bedingungen, d. h. innerhalb mäßiger Druck- und Temperaturschwankungen in einer für den Stoffwechsel geeigneten Umgebung unsterblich, was in der Tat an zahlreichen sogen. Einzelzellen der niederen Lebewelt sowie an den Keimzellen der höheren Organismen festgestellt werden konnte. An diese Keimzellen lagern sich durch Teilung und Abscheidung die einzelnen Körperzellen an, die ihrerseits während des Wachstums ein gemeinsames Leben führen, den Keim gegen äußere Einwirkungen schützen und ihn vor ihrer Abnützung und Zerstörung, d. h. vor ihrem Tode an einen inzwischen neugebildeten Körper abgeben und damit die Kontinuität des Lebens sichern. Da der Stoffwechsel der Zelle sich innerhalb der Zellflüssigkeit abspielt und auf deren fortwährende Erneuerung durch die Zellwand hindurch erstreckt, so wird er durch eine flüssige Umgebung, in der die für das Leben notwendigen Salze und Gase gelöst sind, begünstigt, wenn nicht erst überhaupt ermöglicht. Daher dürfen wir den Ursprung des organischen Lebens, also die ersten Zellen in das Meerwasser verlegen, welches alle hierfür nötigen Stoffe enthält. Dort finden sich auch noch heute schwimmend oder im Tiefseeschlamm eine große Menge einfachster Lebewesen, welche z. T. aus ihrer Umgebung gelöstes Calciumcarbonat aufnehmen und daraus, vermutlich unter dem Einfluß von Ammoniak ihres Eiweißgehaltes in fester Form als Schalen oder Gerüste wieder ausscheiden. Beim Absterben dieser Organismen sinken diese Ausscheidungen zu Boden und bilden Kalksedimente, die nach der Hebung der Meeresböden in den Kalkgebirgen zutage treten. Dieser Vorgang vollzieht sich seit dem Ende der vorgeologischen Zeit bis in die Gegenwart, während inzwischen das organische Leben sich nicht nur bis zu den heutigen Formen entwickelt, sondern auch über das Festland verbreitet und bei dessen Umgestaltung mannigfache Schicksale erlitten hat. Wir dürfen uns daher nicht wundern, in den Kalkgebirgen und Kreidefelsen auch

die Reste zahlreicher höherer Pflanzen und Tiere bis zu den Amphibien zu finden, die den Geologen als sogenannte Leitfossilien die zeitliche Aufeinanderfolge der einzelnen Schichten und damit die geologischen Perioden verraten.

Ohne uns hierauf im einzelnen einzulassen, begnügen wir uns mit der Tatsache, daß insbesondere die niederen Lebewesen sehr stark am Aufbau der festen Erdrinde und des Meeresbodens in ihrer heutigen Gestalt beteiligt sind und noch dauernd vor allem im Meere daran arbeiten, wie die schon erwähnten Korallenbänke deutlich beweisen. Vom Meere aus hat sich das Leben durch die in den Strömen aufwärts wandernden Fische und später durch die Amphibien auch an den Küsten und über das Festland ausgebreitet, wobei sich sowohl die Tiere als auch die Pflanzen den neuen Lebensbedingungen angepaßt und weiter entwickelt haben, während die Urformen der Einzeller sich in Bakterien, Amöben sowie in Algen erhalten haben. Daher finden wir auch heute trotz des Aussterbens mancher Arten infolge von Klimaänderungen oder durch Naturkatastrophen in der Pflanzen- und Tierwelt alle Entwicklungsstufen bis zu den Vögeln und Säugetieren im Zusammenleben auf dem durch die Verwitterung von Gesteinen unter Mitwirkung von Mikroben aufgeschlossenen und mit Stickstoff angereicherten Boden. Diese sogen. Symbiose erstreckt sich nicht allein auf den Nahrungsaustausch, sondern insofern auch auf den Luftraum, als die Pflanzen durch Verwendung der Energie der Sonnenstrahlen die Kohlensäure der Luft im Blattgrün (Chlorophyll) unter Sauerstoffabgabe zu spalten und mit Wasser Kohlenhydrate zu bilden und aufzuspeichern vermögen. Die Tiere dagegen bauen in ihrem Körper daneben noch Eiweiß auf und entnehmen die dazu sowie für ihre Bewegung nötige Energie der Verbrennung der von ihnen verzehrten pflanzlichen Kohlenwasserstoffe mit dem Luftsauerstoff zu Wasser und Kohlensäure. Durch deren Rückgabe an die Luft und die nach dem Absterben aller Organismen einsetzende Stickstoffentwicklung bei der Verwesung sind der atmosphärische und Bodenkreislauf geschlossen.

Die gemeinsame Energiequelle aller dieser Vorgänge, also des ganzen organischen Lebens, ist schließlich die Sonnenstrahlung von etwa $1{,}36\ kW/m^2 = 1{,}85\ PS/m^2$ oder für die ganze Erde $1{,}74 \cdot 10^{14}\ kW = 2{,}36 \cdot 10^{14}$ PS. Einen allerdings verschwindend kleinen Bruchteil dieser Energie gewinnen wir in den Wind- und Wasserkraftanlagen durch Ausnutzung der von den Sonnenstrahlen auf die Luft und den auf der Meeresoberfläche gebildeten Wasserdampf übertragenen Hubarbeit, einen anderen Bruchteil durch die Ausbeutung der in den Wäldern, Kohlen- und Erdöllagern nebst Gasquellen aufgespeicherten Sonnenwärme. Da der Waldbestand durch eine große Wasseraufnahme für das Klima und das Gedeihen der Nahrungspflanzen unerläßlich ist, so kann er für die Gewinnung von Brennholz nicht unbeschränkt herangezogen werden,

würde auch für den derzeitigen und noch dauernd steigenden Energiebedarf der Industrie ebensowenig ausreichen wie die hierfür erschlossenen Wind- und Wasserkraftquellen. Die Menschheit hilft sich darum durch den Abbau der fossilen Brennstoffe, die als nicht ergänzungsfähige Energiespeicher verhältnismäßig rasch der Erschöpfung entgegengehen. Dieser Zeitpunkt ist für das Erdöl in etwa 30 bis 50 Jahren, für die noch ziemlich junge Braunkohle dicht an der Erdoberfläche in etwa 100 Jahren zu erwarten, während die ältere und infolge ihrer Dichte viel heizkräftigere, allerdings auch wegen ihrer Tiefenlage schwerer zu fördernde Steinkohle noch mehrere hundert Jahre ausreichen dürfte. Dazu kommen die in noch kürzerer Zeit drohende Erschöpfung der Eisenerzlager, die uns schon jetzt zu einer immer steigenden Verwendung von Leichtmetall als Industriebaustoff zwingt, von denen das aus der Tonerde entstammende Aluminium in nahezu unbeschränkter Menge zur Verfügung steht. Aber auch die Verhüttung dieser Erze erfordert Brennstoffe und ist mit deren Erschöpfung gefährdet, wenn es uns nicht bis dahin gelingt, andere Energiequellen zu erschließen. Solche bieten sich zunächst in der vorläufig nur probeweise versuchten unmittelbaren Auffangung der Sonnenstrahlen auf weiten, sonst nicht nutzbaren Wüstengebieten und deren möglichst umkehrbare Umwandlung in chemische oder elektrische Energie. Weiter aber in einer viel stärkeren Ausbeutung der Windenergie an geeigneten Küsten und der schon früher erwähnten, nicht überall lohnenden und kostspieligen Aufspeicherung der Flutwellen des Meeres in Wasserkraftanlagen. Die von dem Franzosen *Claude* versuchte Ausnutzung des Temperaturgefälles im Meerwasser zwischen dessen Grunde und der Oberfläche durch Verwendung weiter Rohrleitungen ist vorläufig gescheitert, erscheint aber nicht ganz aussichtslos. Eine letzte Energiequelle bildet der in der geothermischen Tiefenstufe erkennbare Wärmevorrat der tieferen Erdschichten, dessen Ausbeutung durch Bohranlagen mit so bedeutenden Kosten verbunden ist, daß die Menschen sich hierzu erst in äußerster Notlage entschließen dürften.

Alle diese Aufgaben werden unsere Nachkommen zu einer noch stärkeren Umgestaltung der Erdoberfläche und deren oberen Schichten drängen, als sie bisher durch Bauten, Straßen, Bahnen, Kanäle, Talsperren mit Stauseen und Bergwerke, verbunden mit mächtigen Ausschachtungen, Aufschüttungen und Bodensenkungen infolge des Abbaus von Salz-, Erz- und Kohlenlagern in einer gegenüber geologischen Perioden fast verschwindenden Zeitspanne von einigen Jahrhunderten bewältigt wurden. Hat sich so der Mensch vom geologischen Standpunkt aus als ein morphologischer Faktor ersten Ranges erwiesen, so dürfen wir doch nicht vergessen, daß seine Werke durch unabänderliche kosmische Einflüsse, insbesondere durch das periodische Auftreten von Eiszeiten mit völliger Vernichtung bedroht werden, welche die

Bewohner ganzer Länder alsdann zur Übersiedlung in weniger gefährdete Gebiete zwingen. Solche Ereignisse treten indessen im Gegensatz zu Vulkanausbrüchen niemals plötzlich auf, auch geht ihnen nach Überschreiten eines uns anscheinend noch bevorstehenden Höchstwertes der mittleren Jahrestemperatur eine sich auf viele Jahrhunderte ausdehnende Klimaverschlechterung voran, welche zunächst ein langsames Vorrücken vorhandener Gletscher zur Folge hat. Erst wenn diese die unteren Gebirgstäler ausgefüllt und ihre Moränen in das bewohnte Flachland vorgeschoben haben, setzt dessen Verwüstung ein und zwingt die Bewohner unter Zerstörung ihrer Werke zur allmählichen Abwanderung. Danach erst erfolgt die Eisbedeckung des unter deren Druck nach den Gesetzen der Isostasie sinkenden Flachlandes und eine gleichzeitige Hebung des durch Wasserentnahme und Umwandlung in Eis entlasteten Meeresbodens mit Küstenverschiebungen, welche das Antlitz der Erde stark verändern.

Eine Gefährdung des Lebens auf der Erde durch Abnahme der Sonnenstrahlung ist nicht zu befürchten, da es sich bei diesem Vorgang um Jahrbillionen handelt. Dagegen kann eine wenn auch nur langsame Verminderung der Wärmezufuhr eintreten bei einer durch Rückwirkung des Momentes der Flutreibung an der Sonne bedingten Vergrößerung des Sonnenabstandes. Endlich wird die Tagesdauer, wie schon erwähnt, vergrößert durch die Bremsleistung der Sonnen- und Mondfluten von 2,3 Milliarden PS an der Erde, und zwar in einem Betrage von etwa $^{1}/_{1000}$ s im Jahrhundert, also in 100 000 Jahren um 1 s oder auf das Doppelte, d. h. um 86 400 s in 8,6 Milliarden Jahren. Das würde natürlich schon eine wesentliche Umgestaltung der Lebensgrundlage und eine weitgehende Anpassung aller Organismen hieran bedingen, welche trotz der langen Übergangszeit nicht alle Lebewesen überstehen dürften. Diese Tageszunahme infolge der Flutbremsung dauert jedenfalls unter gleichzeitiger Vergrößerung des Sonnenabstandes und Abnahme der Wärmezufuhr solange an, bis alle Ozeane zu Eis erstarrt sind und damit etwa der Zustand der Marsoberfläche erreicht ist, der nur noch ein schwaches Leben niederer Organismen zuläßt. Da ferner der Mond mangels jeder Lufthülle keine Lebensgrundlage bietet, während die etwa dem vorkarbonischen Erdzustand entsprechende Oberfläche des nächsten Planeten Venus mit einer wenn überhaupt bestehenden, so doch nur sehr schwachen Eigendrehung sich hinter einer dichten, wahrscheinlich stark wasserdampf- und kohlensäurereichen Wolkenhülle verbirgt, der Merkur infolge seiner Sonnennähe und die großen Außenplaneten als noch nicht oberflächlich erstarrte Gaskugeln unbewohnbar sind, so gibt es überhaupt im Sonnensystem außerhalb der Erde keine Heimat und Zuflucht für die Menschheit und die höhere Tier- und Pflanzenwelt. Es hat darum auch wenig Sinn, sich mit Raketenfahrzeugen, was theoretisch möglich, augenblick-

lich aber mangels hinreichend starker Treibmittel und leichter sowie gegen hohe Temperaturen und Drücke widerstandsfähiger Raketenbaustoffe noch nicht durchführbar ist, unter Überwindung der Schwere in den Weltenraum zu begeben und sich dort dem Geschoßhagel der überall herumschwirrenden Meteoriten auszusetzen.

Sollte gar die Sonne eines Tages, wie wir es an den sogen. Novae am Fixsternhimmel jetzt häufig beobachten, in einen labilen Zustand geraten und ihre unter Vereinigung von Protonen und Elektronen zu Atomen sich alsdann explosionsartig ausdehnende Gashülle abstoßen und in den Planetenraum treiben, so wären wir mit dem sofortigen Aufflammen aller brennbaren Körper an der Erdoberfläche jeder weiteren Sorge überhoben.

Die Entwicklung des Kraftfahrzeugs *)

Von *Wunibald Kamm* VDI, Stuttgart [1])

Die Zeitreife

Der Beginn der Entwicklung des Kraftfahrzeugs war eine natürliche Erscheinung im angebrochenen Zeitalter der Maschine. Erkenntnisse über die aus hochwertigen Brennstoffen erzielbaren Leistungen und die Beispiele der Anwendung der Kraftmaschine im Verkehr auf der Bahn und zu Schiff förderten den Wunsch und die Aussicht der Menschen, auch auf der Straße mit hoher Geschwindigkeit sich einfach und billig bewegen zu können. Auch der Ersatz der tierischen Zugkraft für höhere Arbeitsleistungen in der Landwirtschaft durch die selbstfahrende Maschine wurde erhofft.

Wenn von einer „Erfindung" des Automobils überhaupt gesprochen werden kann, so ging die Erfindungsaufgabe dahin, das Fahrzeug durch richtige Auswahl des Energieumsetzungsverfahrens, durch Ausbildung des gewählten Motors zu der erforderlichen Leistung und Leichtheit und durch Lösung der grundsätzlichen Aufgaben des Zusammenwirkens zwischen Triebwerk und Fahrwerk zu einer leistungsfähigen Einheit zu gestalten, die eine ausreichende Grundlage für allgemeine Anwendung bildete. Als Zeitpunkt der „Erfindung" des Kraftfahrzeugs muß deshalb auch jener Augenblick angesehen werden, in dem die praktische Anwendung und Entwicklung auf technisch und wirtschaftlich sicherer Grundlage in ununterbrochener Folge eingesetzt hat, d. h. der Zeitpunkt, von dem ab die Menschheit über das betriebsreife Kraftfahrzeug verfügte. Vorläufer dieser Entwicklung haben z. T. dazu beigetragen, die Wahl des zweckmäßigen Weges zu erleichtern durch Einengung der Möglichkeiten auf Grund der Erkenntnisse über die nicht zum Ziele führenden Lösungen.

Dampfmaschine, Elektrizität oder Gasmotor?

Dem nach der geeigneten Antriebsmaschine für ein Straßenfahrzeug suchenden Techniker standen aus den Erfahrungen der Zeit die Dampfmaschine, der Elektromotor mit Akkumulator und der Gasmotor zur Verfügung.

---

*) Vortrag auf der Jahresversammlung des Deutschen Museums in München am 7. Mai 1937.

[1]) Der Verfasser ist o. Professor für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren an der Technischen Hochschule Stuttgart. Als Leiter des Forschungsinstituts für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren, Stuttgart, hat er mit seinen Mitarbeitern aus den Forschungsarbeiten des Instituts über Kraftfahrzeuge, Fahrzeug- und Flugmotoren Veröffentlichungen in den verschiedenen Fachzeitschriften durchgeführt. Sein Buch „Das Kraftfahrzeug", Berlin, Springer 1936, ist ebenfalls auf diesen Arbeiten und auf den Vorlesungen des Verfassers aufgebaut.

Es ist natürlich, daß sich die ersten ernsten Versuche, z. B. von *Cugnot* im Jahr 1769, auf die Anwendung der Dampfmaschine erstreckten als der einzigen in jener Zeit vorhandenen Kraftmaschine, die nicht an ortsfeste Energiequellen gebunden war. Das Ergebnis dieser immer wiederholten Ansätze war aber nie ein durchschlagender Erfolg, weil die Anlage schwer, in ihren Leistungen schwach, teuer und in der Handhabung umständlich war. Selbst die in der neuesten Zeit wiedergekehrten erfolgreicheren Versuche zur Einführung der Dampfmaschine in Lastfahrzeuge und größere Personenwagen sind als Einzellösungen für die Erfüllung bestimmter Aufgaben anzusehen.

Der Elektromotor mit Sammler bot bei seiner Einfachheit in Bau und Bedienung weitergehende Aussichten. Der Elektromotorwagen, der in Einzelversuchen im Jahr 1881 erstmals auftauchte (*Trouvé*, *Raffart*) fand sogar im Wettbewerb mit dem Benzinmotorwagen in den Jahren 1890 bis 1900 eine lebhafte Entwicklung. Doch konnte er bei seinem hohen Gewicht, der beschränkten Leistung und dem begrenzten Fahrbereich nicht zur Grundlage der Fahrzeugentwicklung werden. Auch seine Anwendung bleibt heute auf Teilgebiete beschränkt, die ihm aber hinreichenden Raum für eine nicht zu unterschätzende Bedeutung bieten.

Der Gasmotor in der Form des 1860 patentierten Lenoirmotors hatte sich bei den Versuchen *Lenoirs* für das Fahrzeug noch nicht mit nachhaltigem Erfolg durchzusetzen vermocht.

Er erfüllte jedoch die grundsätzlichen Voraussetzungen mit dem Augenblick, als ihm die Otto-Erfindung der Verdichtung des Gas-Luft-Gemisches 1876 die hohen mittleren Arbeitsdrücke von 4 bis 5 kg/cm^2 verlieh, womit er der mit 1 bis 3 kg/cm^2 arbeitenden Dampfmaschine und den bisherigen Gasmaschinen an Leistung weit überlegen wurde. Sein Gewicht war kleiner, seine Bedienung bei der unmittelbaren Energie-Umsetzung im Arbeitszylinder selbst einfach. Er bot auch die Möglichkeit, das Betriebsgas von hohem Heizwert auf kleinem Raum im Fahrzeug unterzubringen, da die flüssigen, leicht flüchtigen Kohlenwasserstoffe in Form der aus dem Erdöl destillierten Benzine vorhanden waren, die je nach ihrer Zusammensetzung mehr oder weniger nahe der Normaltemperatur schon flüchtig sind. Obschon auch versucht wurde, Betriebsgas in Flaschen verdichtet oder in Stoffhüllen auf Fahrzeugen mitzuführen, war die Betriebsfähigkeit der Gasmaschine mit einer Mischung aus Benzindämpfen und Luft bekannt und an der atmosphärischen Gasmaschine von *Gottlieb Daimler* und *Wilhelm Maybach* in ihrer Tätigkeit bei der Gasmotorenfabrik Deutz etwa im Jahre 1875 nachgeprüft worden, zu der Zeit, als auch Nachrichten über den Versuch von *Marcus* vorlagen, mit einer mit Benzin betriebenen Gasmaschine ein Fahrzeug in Bewegung zu setzen.

So bildete der Otto-Gasmotor, an dessen praktischer Entwicklung Daimler und Maybach wesentlichen Anteil hatten, etwa ab 1880 die tatsächliche erste Grundlage für das Einsetzen einer tragfähigen Automobilentwicklung.

Die Begeisterung der Techniker

An befähigten und begeisterten Technikern hat es seit Beginn der Maschinenentwicklung nicht gefehlt, die Arbeit und Mittel für die Verwirklichung des Kraftfahrzeug-Gedankens opferfreudig einsetzten. Mit dem Ottomotor war der Weg frei für eine technisch aussichtsreiche Lösung und diese ließ sich durch äußere und innere Schwierigkeiten

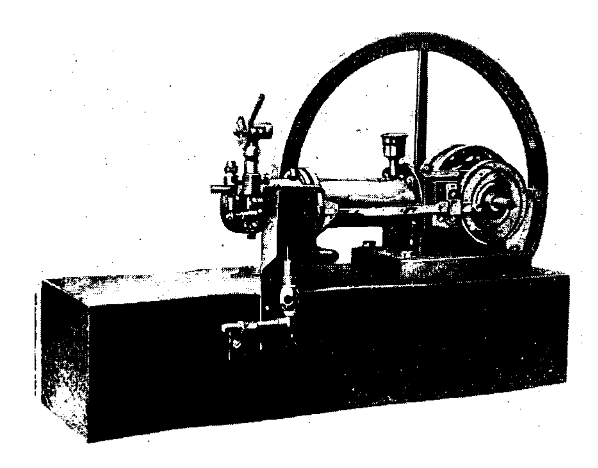


Abb. 1. Der erste schnellaufende Daimler-Motor 1883

nicht mehr aufhalten. Es gab Hemmungen durch die Besserwisserei der Mitmenschen und Ängstlichkeit in den Behörden, die eigenen Mittel der Techniker waren spärlich, die Aufgaben schwierig, dennoch setzte sich der schöpferische Geist durch und lieferte eine Fülle von schönen, für die heutigen Konstruktionen vielfach noch grundlegenden Ausführungsgedanken, wie sie bei Durchsicht der ersten Fahrzeuge und der aus jener Entwicklungszeit vorhandenen Unterlagen aus der Lebensarbeit der Pioniere des Kraftfahrzeugs festzustellen sind.

Die zwei Wege

Stürmisch war, mit dem Maßstab ihrer Zeit gemessen, die Arbeit auf dem als grundsätzlich gangbar erkannten Weg der Anwendung der gemischverdichtenden Gasmaschine für das Fahrzeug. Zwei verschiedene Entwicklungsrichtungen bildeten sich dabei aus.

Gottlieb Daimler ging in der Erkenntnis, daß nur hohe Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge die bisherigen Mängel zu beseitigen und eine nachhaltige Entwicklung einzuleiten vermochte, zunächst auf das Ziel aus, der Otto-Maschine mit dem Mittel der hohen Schnelläufigkeit das niedrige, auf die Leistung bezogene, Gewicht zu geben, das er für schnelle Fahrzeuge auf Straßen, im Wasser, in der Luft für nötig hielt.

Karl Benz nahm als Hersteller von Gasmaschinen, als ihm deren technische Entwicklung dafür reif zu sein schien, in Erfüllung lange gehegter Pläne die Aufgabe in Angriff, unter Verwendung des Gasmotors, den er dazu in der bewährten Form so leicht wie möglich baute, ein fahrfähiges praktisch brauchbares Maschinenfahrzeug zu schaffen.

So entstanden in Deutschland auf der Grundlage der entwicklungsfähigen Otto-Maschine der erste leichte praktisch erfolgreiche Kraftwagen von Benz im Jahre 1885, der 1886 patentiert wurde, und 1883 der erste hochleistungsfähige, schnellaufende Motor von Daimler, dessen Glührohrzündung, die die hohe Schnelläufigkeit ermöglichte, 1883 patentiert wurde. Er fand noch in den achtziger Jahren Anwendung in Straßen-, Wasser-, Schienen- und Luftfahrzeugen, 1885 im ersten Motorrad, 1886 in einer umgebauten Pferdekutsche, im gleichen Jahr in einem Motorboot, 1887 in einer Eisenbahndraisine und in einer Straßenbahn, 1888 im Wölfertschen Luftschiff. Der Umstand, daß uns heute aus den ersten Jahren der Daimler- und Benz-Motoren-Entwicklung nur wenige Zeitangaben über die einzelnen Abschnitte zur Verfügung stehen, ist wohl zum Teil darauf zurückzuführen, daß diese Männer des Automobilbaus ihre Arbeiten sehr geheim hielten, z. T. sogar Patente auf fremde Namen anmelden ließen. Der scharfe Wettbewerb und vielleicht auch die unklare Lage gegenüber dem 1886 gefallenen Otto-Patent sind als Ursachen hierfür anzusehen.

Anlehnung an Vorhandenes, Genialität in Einzelheiten

Das Ausmaß der heute technisch und wirtschaftlich erreichten Kraftfahrzeugentwicklung konnte in jenen Jahren vom größten Optimismus des erfinderischen Ingenieurs nicht vorausgesehen werden. Das Merkmal des Schaffens war daher das Festhalten an den Erscheinungsformen des Fahrzeugs und die Ausgestaltung der Einzelheiten zur Erreichung der erkennbaren Ziele. Bei dieser Gestaltungsarbeit wurde in vieler Hinsicht Großes geleistet.

Kutschwerk

Für den Gesamtaufbau des Motorwagens war das bisherige Straßenfahrzeug, der Kutschwagen und das Fahrrad, das naheliegende Vorbild, *Benz* verwandte einen aus Gasrohren gebildeten Rahmen, *Daimler* baute seine ersten Motoren in Kutschwagen ein, an denen die Pferde-

deichsel durch eine Zahnsegmentsteuerung des Drehgestells ersetzt wurde. Die äußere Form der Kutsche wurde in beiden Fällen übernommen. Die Maschinenanlage wurde dort eingebaut, wo sie Platz hatte und der Treibachse am nächsten lag, also zunächst vor oder unter den Rücksitzen.

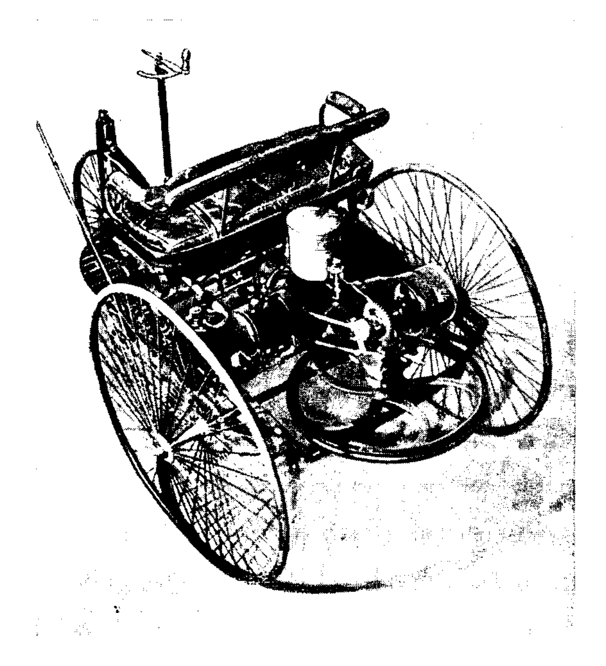


Abb. 2. Benz-Motorwagen von 1885, das erste Fahrzeug in der Reihe der Automobilentwicklung. Mit dem Einzylinder-Viertakt-Motor von 2/3 PS Leistung mit elektrischer Zündung wurde eine Geschwindigkeit von 12 km/h erreicht

Motor

Als Motor seines ersten Wagens verwandte *Benz*, der erfolgreiche Schöpfer und Hersteller leistungsfähiger Zweitakt-Motoren, die ihm hierfür zu schwer und zu wenig einfach erschienen, den Viertakt-Motor in einer von ihm für ortsfeste Zwecke hergestellten Bauart in kleinerer zierlicher Ausführung mit 2/3 PS Leistung bei 250 bis 300 U/min. Er arbeitete mit elektrischer Kerzenzündung mit Induktor und einer kleinen Dynamomaschine, später einer Batterie, als Stromquelle, mit Schiebersteuerung des Gaseinlasses und Ventilsteuerung des Auslasses.

Gottlieb Daimler erkannte, da die schiebergesteuerte Flammenzündung der Gasmotoren bei 200 bis 250 U/min zu versagen begann und daher auch die Einleitung der Zündung auf elektrischem Weg die von ihm beabsichtigte sehr schnelle Verbrennung nicht in Aussicht stellte, daß die reine Gemischverdichtungszündung ein Mittel zur Erreichung unbegrenzter Schnelläufigkeit ist. Er begegnete bei der Verwirklichung dieses Gedankens aber den heute bekannten Detona-

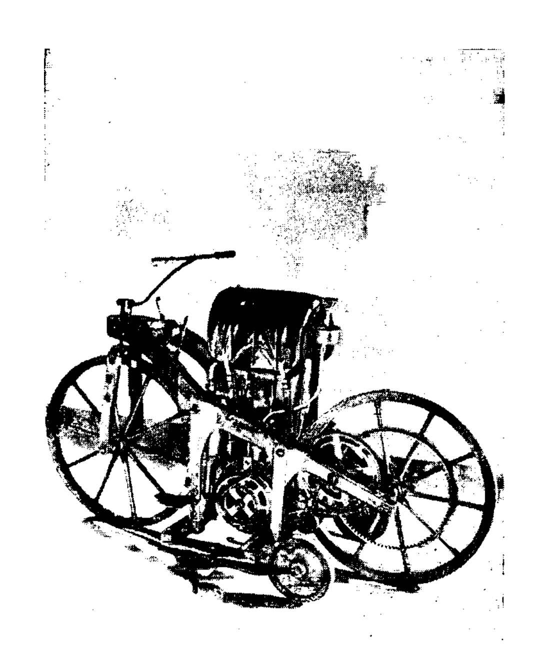


Abb. 3. Erste Anwendung des schnellaufenden Daimler-Motors in einem Daimler-Kraftrad 1885. Leistung 1/2 PS, Geschwindigkeit 12 km/h

tionsschwierigkeiten, hatte also zu schnelle Verbrennung verwirklicht, und wandte sich in Zusammenarbeit mit *Wilhelm Maybach* der Fremdzündung in der Form der Glührohrzündung zu, die bei ihm vorher nur zum Anlassen verwandt werden sollte, womit er den Anteil der Ladung, der bei Beginn der Verbrennung entflammt, auf die in die Nachbarschaft des Glührohrs gelangenden Gemischteile beschränkte, dennoch aber die starke Zündeinleitung bewerkstelligt, wie sie später in Verbindung mit kräftiger Ladungsdurchwirbelung mit der elektrischen Abreiß- und Hochspannungs-Kerzenzündung von

Bosch erzielt wurde. Er erreichte mit dem Glührohrantrieb Drehzahlen bis 900 U/min und ein Leistungsgewicht von nur 40 kg/PS gegenüber 200 kg/PS beim langsamlaufenden ortsfesten Ottomotor. Die Steuerung des Auslaßventils erfolgte mittels Kurvenscheiben, das Einlaßventil öffnete sich selbstätig durch den beim Saughub entstehenden Unterdruck.

An beiden Stellen, bei *Daimler* und *Benz*, wurden zur Benzinaufbereitung Oberflächenvergaser verwandt.

Getriebe

Für die Drehzahlübersetzung zwischen Motor und Treibachse erwies sich bei der Unveränderlichkeit des Drehmoments der Gasmaschine schon nach den Erfahrungen mit dem ersten Benzwagen eine Stufenschaltung als erforderlich. Sie wurde bei *Benz* und *Daimler* zuerst durch Riemenvorgelege verwirklicht, dann bei *Daimler* (1889) durch verschiebbare Zahnräder in Verbindung mit einer Kegelreibungs-Kupplung und später an mehreren Stellen auch durch stets in Eingriff stehende Zahnräder, die mit Kegelkupplungen geschaltet wurden.

Antrieb

Die Überleitung der Leistung vom Riemengetriebe auf die nicht gelenkte Hinterachse als Treibachse erfolgte bei *Benz* mit Ketten, bei *Daimler* mit Hilfe großer an den Treibrädern angebrachter Zahnkränze, in die kleine, auf der Getriebe-Endwelle sitzende Ritzel eingriffen. Das seit 1828 und 1830 aus Dampfwagenversuchen bekannte Ausgleichsgetriebe für die Ermöglichung der Voreilung des kurvenäußeren Treibrades wurde von *Benz* schon in seinem ersten Wagen und, nachdem *Daimler* anfangs eine Rutschkupplung eingebaut hatte, in der weiteren Entwicklungszeit des Automobils fast allgemein angewandt.

Federung

In der Ausbildung der Federung erfolgte zunächst die Anlehnung an die geschichteten Blattfedern der Kutsche, einfachere Wege wurden auch schon damals eingeschlagen, so von *Daimler* 1890 durch Verwendung von Schraubenfedern in Verbindung mit einer Führung der Achse durch Lenkerstangen.

Lenkung

Für die Lenkung verwandte *Daimler* bis 1895 die Drehschemelanordnung, *Benz* zunächst Einradlenkung, dann mit einer geteilten Spurstange die ihm geschützte Achsschenkellenkung, die später allgemein verwendet wurde.

Für die Vornahme der Lenkbewegung am Führersitz dienten anfangs Hebel, dann das Lenkrad. Die Übertragung erfolgte zunächst mit Zahnrädern oder Hebeln ohne Hemmung, später unter Zwischen-

schaltung selbsthemmender Schneckengetriebe. Ausreichende Fehlerlosigkeit in der Lenkbewegung und der Überbrückung des Federweges wurde mit Mitteln erzielt, die heute z. T. noch üblich sind. Das Lenktrapez wurde angewandt, Einzelheiten, wie etwa die Umgehung des Federweges durch Einschaltung besonderer Hilfsfedern in die Lenkgestängeübertragung, sind wieder verschwunden.

Bremsen

Die Radklotzbremse der Kutsche mußte mit der Einführung der Gummireifen der auf Riemenscheiben oder andere Getriebeteile wirkenden Band- oder Backenbremse weichen, der später die Außen-

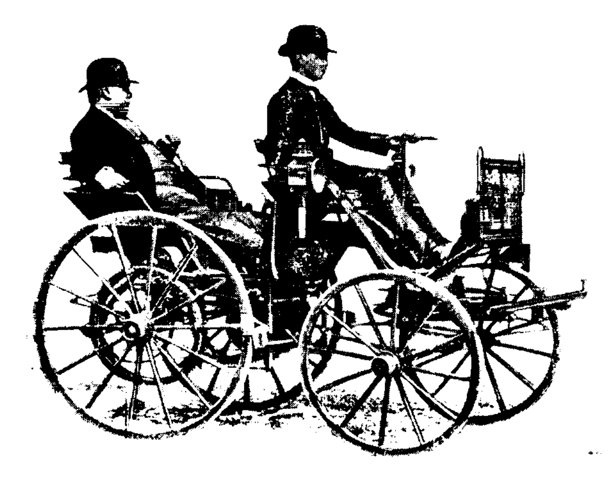


Abb. 4. Erster Daimler-Wagen 1886. Im Wagen Gottlieb Daimler, auf dem Führersitz Adolf Daimler

und Innenbackenbremsen mit besonderen Bremstrommeln folgten. Lange Jahre hindurch ging die Bremswirkung auf die nicht gelenkte Triebwerksachse allein.

Die Entwicklung zur heutigen Form des Fahrzeugs

Die nach der Schaffung des Kraftwagens einsetzende weitere Entwicklung erstreckte sich auf die Vervollkommnung der Einzelheiten mit dem besonderen Merkmal der allgemeinen Einführung der Hochspannungs-Kerzenzündung und den Übergang zu neuen äußeren Formen nach den Notwendigkeiten der baulichen Anlage und des Fahrbetriebes. Ein zielsicheres Hinsteuern auf die Endlösung eines dem Zweck in bester Form und mit dem geringsten Aufwand frei von

alten Entwicklungsanhängseln dienenden Fahrzeugs ist nicht zu erkennen. Die technischen Einzelheiten allerdings fanden eine sehr weitgehende Ausreifung.

Motor

Die Bedürfnisse der schnelleren Fahrt und der Beförderung vergrößerter Lasten bedingten die Schaffung von Motoren höherer Leistung mit größeren Abmessungen der Zylinder und größeren Zylinderzahlen. 1889 entstand der V-förmige, 1892 der reihenförmige 2-Zylinder-

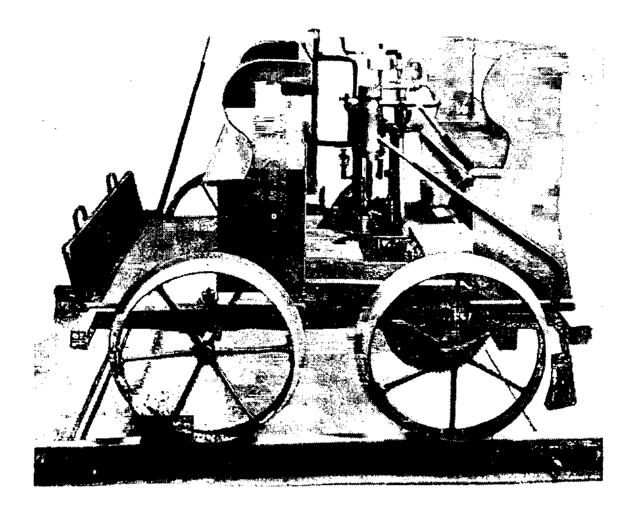


Abb. 5. Daimler-Draisine 1887. Geschwindigkeit 20 km/h

Daimler-Motor, der in Frankreich viel für Rennfahrzeuge verwandt wurde, 1897 der Benz-Boxer-Motor und 1898 der 4-Zylinder-Daimler-Motor. Die Drehzahlen wurden in den Jahren bis 1897 auf 1400 und 1500, ja bis 1800 U/min gesteigert. Aus Berichten über die Rennen jener Zeit ist zu entnehmen, daß der von Panhard & Levassor in Frankreich gebaute, auch in Peugeot-Wagen verwandte Daimler-Motor die wesentlichsten Erfolge an sich riß und daher mit Recht der Daimler-Motor als der beste Fahrzeugmotor der Welt angesehen wurde.

Mit dem Verlassen der Glührohrzündung fiel sein Patentschutz. Er drückte nun der gesamten, in vielen Ländern lebhaft einsetzenden Fahrzeugmotoren-Entwicklung den Stempel seiner baulichen Eigenarten und der mit ihm erreichten Leistungen auf.

Von dieser Entwicklung um die Jahrhundertwende war, insbesondere da die Hochspannungszündung, die sich als Bosch-Zündung von 1897 ab die Welt eroberte, der Schritt zu den heutigen Motoren mit 4, 6 und mehr Zylindern und den Drehzahlen bis über 3000 U/min nicht mehr sehr weit. Die Bauarten wurden vereinfacht, die Herstellung verbilligt und die Ausbildung der Verbrennungsräume auf Grund der durch die Wissenschaft gelieferten Erkenntnisse über die Verbrennungsvorgänge verbessert.

Getriebe

Im Getriebebau wurden in den Jahren von 1880 bis 1898 alle Möglichkeiten, die Riemen, Reibräder, Schiebezahnräder, kuppelbare Zahnräder und die als Kegelkupplungen ausgebildeten Reibungskupplungen boten, angewandt. Es entwickelte sich aber als Norm das Vorgelegegetriebe mit Schiebezahnrädern und der für den unmittelbaren Gang kuppelbaren Welle mit der von *Maybach* geschaffenen, später in die Kugelschaltung abgewandelten Kulissenschaltung.

Antrieb

Im Achsantrieb wurde die von der Getriebequerwelle zur Hinterachse geführte Rollenkette verdrängt von der Gelenkwelle mit metallischen Gelenken für größere und Gummischeibengelenken für kleinere Drehmomente. Die Gelenkwelle hat als kurze Welle im Betrieb der Schwingachs- und Vorderradantriebs-Wagen bei großen Ausschlagswinkeln Übertragungsleistungen erzielt, die man nicht für möglich gehalten hatte. Die Entwicklung der Gelenke hat allein schon ein reiches Betätigungsfeld der Ingenieure gebildet.

Federung

In der Radabfederung führte die Entwicklung über die jahrelange Verwendung der geschichteten Blattfeder zur Drehfeder in Form der Schraubenfeder und des Drehstabes, in der Radaufhängung von der Starrachse zur Schwingachse. Heute stehen, je nach dem Zweck des Fahrzeugs, alle Ausführungsmöglichkeiten zur Verfügung.

Lenkung

In der Lenkung galt die Entwicklung der Vervollkommnung der mit Selbsthemmung arbeitenden Schnecken- und Schraubengetriebe, bis in neuerer Zeit sich die Erkenntnis durchsetzte, daß die Vermeidung großer aus dem Laufrad eingeleiteter Kräfte im Lenkgestänge durch zweckmäßige Radaufhängung richtiger ist als ihre Aufnahme durch Selbsthemmung im Lenkgetriebe. Der Weg rückwärts zu einfachen, leichtgängigen hemmungsfreien Zahnstangenlenkungen ist damit bei den leichteren Fahrzeugen wieder gangbar geworden.

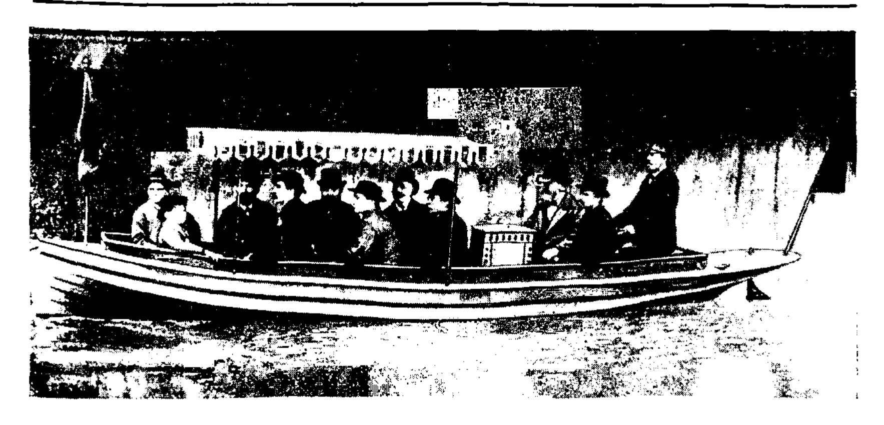


Abb. 6. Schnellaufender Daimler-Motor im Motor-Boot 1886
(Vor dem Steuermann Gottlieb Daimler und Wilh. Maybach)

B r e m s e n

In der Bremsanlage vollzog sich die wirksamste Vervollkommnung mit dem Übergang zur Vierrad-Bremsung. Weitere Verbesserungen wurden durch Druckluft- und Öldruckübertragung sowie durch die Anwendung der Hilfsbremswirkung auf dem Reibungswege und mit Druckluft oder Öldruckzylindern erreicht, die bei schweren Fahrzeugen notwendig geworden ist.

B e s o n d e r e E n t w i c k l u n g s e r s c h e i n u n g e n

Die wesentlichste Änderung im Aufbau des Fahrzeugs vollzog sich durch die Verlegung des Motors von der Rückseite aus der Nähe der Treibachse nach vorn, zunächst unter Beibehaltung des Antriebs der Hinterachse. Die Gründe dafür lagen in den mit der Vergrößerung der Maschinenanlage auftretenden Erfordernissen der Raumaufteilung für Insassen und Maschine, der Notwendigkeit, die Sitze zur Erhöhung der Fahrsicherheit tiefer anzuordnen und in der Zweckmäßigkeit der besseren Zugänglichkeit des Motors. Damit erhielt das Kraftfahrzeug seine von der früheren Kutsche abweichende Eigenform, ohne sich aber von jener im Aufbau der Karosse freizumachen.

Heutiger Stand

Der heutige Stand der technischen Entwicklung des Kraftfahrzeugs kann als das Ergebnis der langsamen Anpassung an die Forderungen des Verkehrs und der Wirtschaft angesehen werden.

Nach den Großtaten der Schöpferjahre wurde nur einmal wieder ein wesentlicher Schritt in der Wagenentwicklung getan. *Henry Ford* war es, der den Grundsatz Daimlers, daß nur ein sehr leistungsfähiger

Motor eine erfolgreiche Wagenentwicklung herbeiführen könne, nach der Seite des Fahrzeugs hin ausweitete und dieses so leicht und einfach baute, daß es mit einem ausreichend großen aber noch billig herzustellenden Motor gute Fahrleistungen und leichte Schaltbarkeit erreichte und die Grundlage für billige Herstellung in einfachen Verfahren bildete. Mit diesem, dem Stand der Technik bei seiner Schöpfung um 10 Jahre vorausgeeilten Modell T hat *Ford*, nachdem er sich von fremdem Kapital und von unverständigen gewinnsüchtigen Menschen freigemacht hatte, es fertig gebracht, dem Kraftwagen den Weg in breite Käuferschichten zu eröffnen.

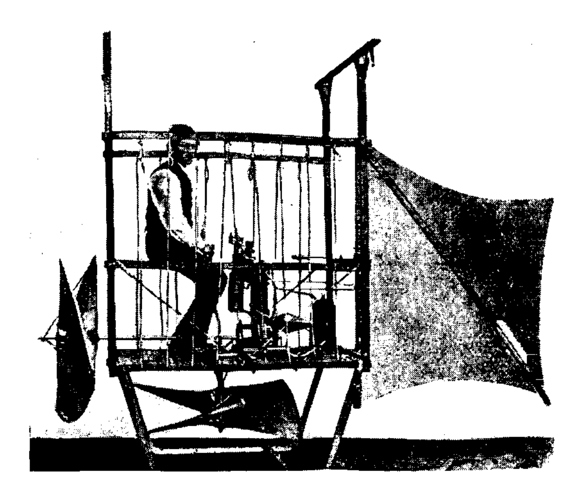


Abb. 7. Daimler-Motor in der Gondel des Luftschiffs von Wölfert 1886 (in der Gondel Dr. Wölfert, gest. 1897)

Gewiß hat es in der neueren Zeit auch in Deutschland nicht an Technikern gefehlt, die zu erkennen vermochten, daß das Kraftfahrzeug noch zweckmäßiger, einfacher und billiger, dennoch aber betriebssicherer und leistungsfähiger gestaltet werden konnte. Ihre aufopfernden Bemühungen, insbesondere in der Nachkriegszeit, die eine Neubelebung der Fahrzeugentwicklung verlangte, fanden aber kein Verständnis, da Kapital und Industrie kurzsichtig auf wirtschaftliche Ausnützung des Vorhandenen und auf Nachahmung des fremden Vorbilds eingestellt waren, indem sie der im Krieg weitergediehenen ausländischen Entwicklung mit „nachempfundenen“ Konstruktionen folgten und in Amerika organisch gewachsene Herstellungsverfahren in künstlichem Aufbau unvermittelt nach Deutschland verpflanzten,

ohne daß hier die nötigen Absatzbedingungen gegeben waren. Millionen wurden umsonst geopfert und an Neuschöpfungen wurde vorbeigegangen, die vor mehr als einem Jahrzehnt das verkörperten, was heute als fortschrittliche Erkenntnis gilt, und nach Durchreifung in Herstellung und Betrieb heute die Grundlage für das Eindringen des Kraftfahrzeugs in die Gemeinschaft des Volkes bilden konnten, nach der erneut gesucht werden mußte.

Dennoch stellt das Kraftfahrzeug in der bis jetzt geschaffenen Form ein unentbehrliches Glied in der Reihe der Verkehrsmittel dar, das der Ergänzung und Leistungssteigerung von Eisenbahn, Schiff und Luftfahrzeug dient, und eines der wichtigsten Beförderungs- und Kampfmittel neuzeitlicher Heere bildet.

Es ist, obwohl es noch nicht Allgemeingut des Volkes werden konnte, heute in Deutschland, da es neben Rundfunk, Lautsprecher und Flugzeug die gewaltige Umformung des Volkes aus der Zerrissenheit zur geschlossenen Einheit durch unseren Führer ermöglicht hat, zum volkstümlichen Verkehrsmittel geworden. Ihm sind vom Führer nach dem Umbruch der deutschen Wirtschaft die Grundlagen einer weiteren großen Entwicklung gegeben und die Aufgabe des Einsatzes für die Lebensgestaltung des Volkes zugewiesen worden.

Technische Merkmale

Den augenblicklichen Aufgaben ist das übliche Personenfahrzeug mit Höchstgeschwindigkeiten von 80 bis 135 km/h gewachsen bei Leistungen von 18 bis 120 PS, Gewichten von 600 bis 1800 kg und einem Brennstoffverbrauch von 6 bis 20 l/100 km. Lastwagen und Omnibusse stehen für Geschwindigkeiten bis 80 km/h und für Nutzlasten bis 10 t zur Verfügung.

Der Gang der M o t o r e n neuerer Fahrzeuge ist ruhig. Eine 6- oder 8-Zylindermaschine mittlerer Größe ist bei der Fahrt neben den Geräuschen des Windes und der Reifen kaum noch zu hören. Dies wird erzielt durch weitgehenden Ausgleich der Kräfte im Motor, durch starren Blockbau, durch Abdämpfung von Schwingungen, durch Klopfverhütung mit guten Brennraumformen und durch Lagerung des Motors in Gummi. Die Rückwärtsentwicklung zum einfachen Vier-Zylindermotor ist zum Stillstand gekommen, die grundsätzlichen Vorzüge des guten Massenausgleichs der 6-Zylindermaschine setzen sich durch und veranlassen den Betriebsingenieur, auch für diesen Motor billige Herstellungsverfahren zu schaffen. Die Ausrüstungsteile des Motors sind zu hoher Vollkommenheit entwickelt, so die Zündung und die Vergaser mit Anlaßeinrichtungen und selbstätigen Regelungen für störungsfreien Übergang und für die Gemischzusammensetzung, womit sich auch Maßnahmen zur Ersparnis von Brennstoffen bei schneller Dauerfahrt anbahnen.

In der Leistungsübertragung ist die fußbetätigte Kupplung und das 4-Gang-Getriebe mit 3 und z. T. 4 geräuscharmen und synchronisierten Gängen zu einer gewissen Ausreifung gelangt. Weitere Fortschritte werden angestrebt mit der hydraulischen Kupplung und dem hydraulischen Getriebe mit halb selbsttätiger Unterdruckbedienung der Kupplung, in Fortführung der *v. Soden*schen Arbeiten mit mechanisch und elektrisch bedienten Vorwählgetrieben, und mit elektrischen oder hydraulischen Handschaltungen.

Das von *K. Maybach* geschaffene Schnellganggetriebe findet, da es seine Wirtschaftlichkeit unter Beweis gestellt hat, allgemeinere Anwendung in vielen Formen und führt zum Maybachschen Vielganggetriebe als einer dem stufenlosen Getriebe nahekommenden, den Streckenverbrauch stark vermindernden und technisch schon reifen Lösung.

Im Rahmenbau sind der hochstegige übliche Kastenrahmen aus U- oder Rohr-Profilen, der Zentralrahmen und der X-Rahmen entwickelt und Annäherungen an den selbsttragenden Wagenkörper versucht.

Die Einzel-Radaufhängung und Einzelfederung hat sich im kleineren Wagen fast allgemein bewährt und über die Zweckmäßigkeit der Wahl fester oder geteilter Achsen wertvolle Erkenntnisse geschaffen. Für die Verbesserung der Straßenlage und Kurvenhaltung werden Hilfseinrichtungen, wie Stabilisatoren und besondere Stoßdämpfer-Schaltungen, sowie Schubstreben und besondere Federanordnungen angewandt.

Bei den Bremsen ist die hydraulische Übertragung neben der durch Seilzug zur Vollkommenheit entwickelt. Die Bemessung der Bremsen und ihre Ausrüstung in Bremsbelag- und Trommelwerkstoff genügt bei den Personenwagen zur Erreichung der theoretisch möglichen kürzesten Bremswege, bei Lastwagen liegen jedoch infolge der großen Gewichte und der durch die Raumverhältnisse begrenzten Abmessungen Schwierigkeiten für die Abführung der in Wärme umgesetzten Bremsenergie vor.

Die Wagenaufbauten sind in ihrer heutigen, technisch noch nicht ganz zweckmäßigen Ausbildung zu einer gewissen Vollkommenheit in der Erscheinung, in der Raumeinteilung und in der Ausstattung gediehen. Sie sind im allgemeinen geräumig und bequem, durch Verwendung von Stahlblech und Sicherheitsglas den Forderungen der Fahrsicherheit und durch Schaffung ausreichender Räume für Gepäck, Werkzeug und Ersatzrad den Reiseansprüchen angepaßt. Sie sind befriedigend belüftet und z. T. geheizt.

Die Männer der Technik, deren Lebensarbeit der Erreichung dieser Leistungen gedient hat, alle zu nennen, ist an dieser Stelle nicht möglich. Möge es gelingen, ihrem Schaffen in der nun werden-

den Sammlung hier an dieser würdigen Stelle das gebührende Denkmal zu setzen!

Die weiteren Aufgaben

Heute nun sind in Deutschland neue Grundlagen für die Automobilentwicklung gegeben durch die Maßnahmen des nationalsozialistischen Staates, die dem Vordringen des Kraftwagens in breitere Schichten des Volkes die Wege ebnen, und insbesondere durch das Werk des Führers, die Autobahnen, die das Fahrzeug von der Zwangsjacke der bisherigen ungenügenden Straßengestaltung befreien und die Grundlage für eine Entwicklung zu höheren Leistungen bei gesteigerter Wirtschaftlichkeit bilden.

Beseitigung der verdeckten Fehler

Zur Erreichung dieser Leistungssteigerung und Verringerung des Bauaufwands und Betriebsmittelverbrauchs gilt es, das heutige Fahrzeug, insbesondere das Personenfahrzeug, seiner verdeckten Fehler zu entkleiden. Diese sind zu schweres Gewicht, leistungfressende Formen, zu hoher Betriebsmittelverbrauch der Maschinenanlage, zu hoher Reifenverschleiß, zu große Vielseitigkeit der entwickelten Muster. Zu beseitigen sind ferner die Hemmungen der Entwicklung durch die Trägheit menschlicher Auffassungen, durch die Eitelkeit und durch die Überordnung wirtschaftlicher Zusammenhänge über die völkische Verpflichtung, aufs neue unvergängliche Werte deutscher Leistung zu schaffen.

Die Forderungen und Möglichkeiten

Der Fortschritt wird erleichtert durch Erkennung der Einzelaufgaben, die dem Fahrzeug nach seiner Eigenart und seinen Möglichkeiten zu stellen sind:

Die Forderungen lauten auf:

hohe Fahrleistungen durch Schnellfahrt in den vertretbaren Grenzen von 130 bis 150 km/h und durch ausreichende Steigungs- und Beschleunigungsfähigkeit,

höchste Wirtschaftlichkeit bei Inanspruchnahme dieser hohen Leistungen und im Bereich der üblichen Gebrauchsleistungen,

Sicherheit im Bau und in den Fahreigenschaften.

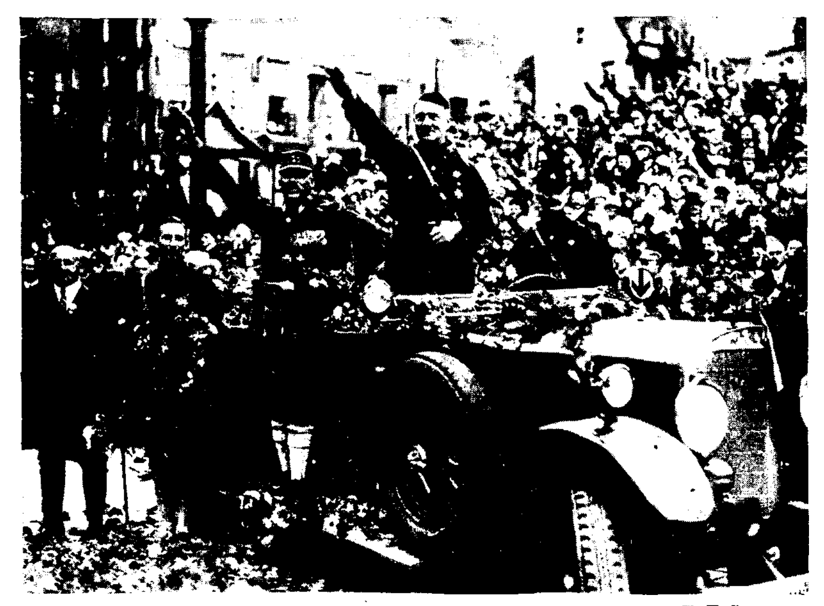
Die Lösungen bestehen:

in der Anwendung ausreichender Motorleistungen unter Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Energieumsetzung,

in der vollkommeneren Verwirklichung des Leichtbaus,

in der Erzielung niedrigen Luftwiderstands,

in der Erhöhung der tatsächlichen Festigkeit der Bauteile und der Verbesserung der Fahreigenschaften.



(Phot. H. Hoffmann)

Abb. 8. Der Kraftwagen im Dienste des Führers in der Kampfzeit (Parteitag Nürnberg 1927)

Als Motorleistungen werden für Personenwagen unter Anwendung des Leichtbaus und der Mittel für niedrigen Luftwiderstand nur 30 bis 50 PS benötigt, womit bei 600 bis 1000 kg Wagengewicht das Leistungsgewicht 20 kg/PS eingehalten werden kann, das Beschleunigungswerte von 1 m/sec² bei 30 bis 40 km/h Fahrgeschwindigkeit, bei 1,6 bis 2 m² Stirnfläche die Erreichung der Geschwindigkeit 150 km/h gestattet. Bei größeren Omnibussen und Lastwagen sind mit 100 bis 150 PS Leistung die Leistungsgewichte 40 bis 50 kg/PS für Fahrgeschwindigkeiten bis gegen 100 km/h nötig.

Die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit in der Energieumsetzung ist zu erzielen durch Vervollkommnung der Regelung des Motors unter Erhöhung der Getriebestufenzahl, womit unter Anwendung des Leichtbaus und kleinen Luftwiderstands Geschwindigkeiten von 130 bis 150 km/h mit 10 bis 12 l/100 km Fahrstrecke und solche von 100 km/h mit 6 bis 8 l/100 km gefahren werden können.

Leichtbau, der eine Herabminderung des Gewichts um 20 bis 25 % ermöglicht, läßt sich durch Anwendung der im Flugzeugbau bekannten Schalenbauweise unter Anpassung an die beim Kraftfahrzeug vorliegenden besonderen Bedingungen und Entwicklung einfacher Verfahren des Zusammenbaus erzielen.

Die Maßnahmen der Gewichtserleichterung werden sich außer auf den Wagenkörper auch auf die übrigen Bauteile zu erstrecken haben, insbesondere auf den Motor, zunächst in einer weiteren Annäherung an die Flugmotorenbauarten, später unter starker Steigerung der Hubraumleistungen und Anwendung einer großen Zahl kleiner Zylinder, womit billige Herstellung in Spritzguß- und Revolverarbeit und die wirtschaftliche Verwirklichung niedriger Leistungsgewichte möglich sind.

Der Luftwiderstand läßt sich von den Luftwiderstandszahlen 0,5 bis 0,6 auf 0,2 bis 0,3 vermindern, womit der oben erwähnte niedrige Leistungsbedarf von 30 bis 50 PS für Personenwagen bei Geschwindigkeiten bis 150 km/h ermöglicht wird.

Die Sicherheit der Bauteile kann bei sorgfältigster Ausbildung auf hohe Stückfestigkeit, unter Berücksichtigung aller Erkenntnise über Kerbwirkung, Formfestigkeit und Empfindlichkeit auch unter weitgehendem Verzicht auf die höchstveredelten und -vergüteten Werkstoffe erreicht werden.

Eine Erhöhung der Sicherheit durch Verbesserung der Fahreigenschaften ist möglich bei Wahl des die Richtungshaltung verstärkenden und Schleuderneigung vermindernden Vorderradantriebs für schnelle Fahrzeuge unter Verwirklichung hoher Vorderachsbelastung, durch leicht überwiegende Vorderradbemessung und Maßnahmen zur Verhütung der Verblockung der Räder und durch Lenkung bei schneller Fahrt nur an den Vorderrädern.

Die Federung ist auch bei kleinen Fahrzeugen und niedrigen Wagengewichten mit großen Federwegen von 10 bis 15 cm, möglichst bis 20 cm zu versehen und ohne Reibung stark zu dämpfen. Die Nützlichkeit kleiner Radmassen, die mit der Schwingachse verwirklicht sind, ist heute erkannt, nicht ganz klar aber die Forderung, daß mit der Schwingachse langsame Schwingzahlen mit 40 bis 60 je Minute, also große Federweichheit, verbunden sein müssen, und daß Seiten- und Winkelbewegungen vom Rad möglichst fernzuhalten sind. Das Rad in einer Ebene bewegende Längsausleger erfüllen diese Forderungen und ermöglichen kurze Baulänge des Haupttragkörpers des Wagens, was gewichtserleichternd wirkt.

Nach Verwirklichung dieser technischen Verbesserungen und Vereinfachungen wird der Kraftwagen auch in den Gebrauchsbereich des Kraftrades und des Kraftradgespanns eindringen mit den Vorteilen der größeren Fahrsicherheit und des Schutzes der Insassen gegen Wetter und Schmutz. Die Anwendung des Kraftrads kann dann der sportlichen Ertüchtigung und den Zwecken des Heeres und der Polizei vorbehalten bleiben.

Die zeitlichen Abschnitte der Kraftfahrzeugentwicklung

Mit einer solchen Entwicklung wird in wenigen Jahren der zweite Abschnitt im Bau der Kraftfahrzeuge erreicht werden können, der zweite Abschnitt von insgesamt dreien.

Der erste Abschnitt reicht von der Einleitung des Automobilbaus durch *Daimler* und *Benz* bis zur heute vorliegenden Betriebsreife des Kraftfahrzeugs als eines voll einsatzfähigen Verkehrsmittels.

Der zweite Abschnitt wird es bei richtigem Einsatz der Kräfte ermöglichen, auf den oben angedeuteten Wegen nur mit Benützung der heute bekannten, aber noch nicht ausreichend angewandten, technischen Mittel das schnellfahrende, wirtschaftliche und betriebssichere Kraftfahrzeug zu schaffen, das die mit den Autobahnen gegebenen Möglichkeiten dem allgemeineren Verkehr zugänglich macht.

Der dritte Abschnitt der Entwicklung wird sich in fernerer Zukunft nach Lösung heute noch bestehender grundsätzlicher Schwierigkeiten und neuer Probleme auf eine noch weitergehende bauliche Vereinfachung erstrecken, wenn es gelungen ist, die Leistungsfähigkeit der Motoren, u. U. mit neuen Arbeitsverfahren im Sinne der unbegrenzten Schnelläufigkeit *Gottlieb Daimlers* so zu steigern, daß der Raumbedarf des Motors im Wagen nicht mehr bestimmend für die Gesamtgestaltung ist, sondern die Antriebsaufgaben mit im Fahrzeug verschwindenden Baugruppen gelöst werden können, die, vereinheitlicht, eine noch weitergehende Herstellungsverbilligung ermöglichen.

Zeitpunkt für die Errichtung der Kraftfahrzeugsammlung im Deutschen Museum

Mit dem nunmehr vollendeten ersten Abschnitt der Entwicklung ist der Zeitpunkt gegeben, nach der Weisung des Führers die vorliegenden Leistungen, die zu den Meisterwerken der Technik zählen, in der im Werden begriffenen Kraftfahrzeug-Sammlung des Deutschen Museums in geschlossener und dem Ingenieurnachwuchs zur Lehre dienender Zusammenfassung darzustellen.

Möge der unerhörte Antrieb, den die Maßnahmen des nationalsozialistischen Staats dem Kraftfahrwesen geben und die Erkennung der auf die Zukunft des Volkes eingestellten nationalsozialistischen Richtungsweisung für Wirtschaft und Technik durch alle in der Kraftfahrzeugentwicklung tätigen Deutschen Anlaß dazu sein, daß die deutsche Technik das unsterbliche Verdienst erwirbt, die von ihr eingeleitete Automobilentwicklung auch zu dem allein würdigen, vom Führer gesteckten Ziel zu bringen, dem Volke in seiner Gesamtheit zu dienen.

Das Fernrohr

Von *Clemens Münster*, Jena *)

Vorbemerkung

1. Alle Geräte zum Beobachten und Messen sind Erweiterungen der menschlichen Sinnesorgane. Die Beobachtungsinstrumente können einem Sinnesorgan Wirkungen zugänglich machen, die wegen ihres Abstandes vom Organ keinen Reiz ausüben (z. B. Sehrohr, Fernsprecher); sie können die Empfindlichkeit eines Sinnesorgans steigern (z. B. Fernrohr, Mikroskop); sie können ihrer Art wegen nicht wahrnehmbare Wirkungen in Reize verwandeln (z. B. Elektroskop). Die Meßgeräte ermöglichen Wahrnehmung und unmittelbaren Vergleich zweier Reize, von dem der eine als Maß des anderen dient (z. B. Skala und Zeiger).

Alle Reize gehen von Gegenständen der Wirklichkeit aus; die durch sie ausgelösten Empfindungen erlauben Schlüsse auf die Wirklichkeit. Der Bereich der erfahrbaren Dinge ist also durch die Leistungsfähigkeit der Sinnesorgane begrenzt. Mit der Steigerung ihrer Leistungsfähigkeit durch Geräte wird jener Bereich erweitert.

2. Das vollkommenste Sinnesorgan ist das Auge; daher läßt man die meisten Instrumente schließlich auf das Auge wirken („Ablesung"). Das Auge ist empfindlich für Richtung, Stärke und Art von Lichtreizen. Die optischen Beobachtungsinstrumente bewirken entweder eine Verlegung des Augenortes (Sehrohr) oder eine Vergrößerung der Richtungsunterschiede (Mikroskop, Erdfernrohr) oder eine Verstärkung der Lichtreize (astronomisches Fernrohr) oder eine Veränderung der Art der Lichtreize (Spektroskop). Die optischen Meßgeräte ermöglichen den Vergleich von Lichtreizen nach ihrer Richtung (Winkelmeßgeräte) oder ihrer Stärke (Photometer) oder ihrer Art (Spektrometer).

Das Fernrohr dient dazu, entfernte Gegenstände an einem bestimmten Ort in bestimmter Helligkeit und Winkelgröße abzubilden. Es soll im allgemeinen eine Annäherung an die beobachteten Gegenstände ersetzen und bei Messungen die zu messenden Winkel vergrößern.

---

*) Der Verfasser ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der optischen Werke von C. Zeiss, Jena.

Die optische Abbildung

A. Allgemeines

3. Das L i c h t ist eine Wellenbewegung. In demselben Maß, in dem die Gegenstände, die die Ausbreitung des Lichtes beeinflussen, groß gegenüber der Wellenlänge des Lichtes sind, kann die Darstellung der Ausbreitung in Wellenflächen ersetzt werden durch die Darstellung der Ausbreitung in Lichtstrahlen. Die Lichtstrahlen sind die Normalen auf die Wellenflächen. Sie breiten sich unabhängig voneinander gradlinig aus, sie sind Träger der strahlenden Energie und die durch sie bewirkte Abbildung ist umkehrbar.

Fällt ein Lichtstrahl aus einem Medium 1 auf ein Medium 2 unter dem Winkel α mit dem Lot auf die Grenzfläche, so gilt für den Winkel α' des ins Medium 1 r e f l e k t i e r t e n Strahls

$$\alpha' = -\alpha \quad (1),$$

für den Winkel α' des ins Medium 2 g e b r o c h e n e n Strahls mit der Normalen

$$n_2 \sin \alpha' = n_1 \sin \alpha \quad (2).$$

Die Brechungsindices n_1 und n_2 sind Materialkonstanten der Medien 1 und 2 und hängen von der Farbe des Lichtes ab. Aus (2) folgt, daß bei einem Einfallswinkel, für den $\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha \geqq 1$ ist, kein gebrochener Strahl mehr entsteht, da $\sin \alpha'$ nicht über 1 wachsen kann; alles Licht wird dann reflektiert. Diese T o t a l r e f l e x i o n kann offenbar nur eintreten, wenn der Strahl in einem optisch dichteren Medium (z. B. Glas) auf die Grenze eines dünneren (z. B. Luft) fällt.

Wenn keine Totalreflexion eintritt, verteilt sich die Energie des einfallenden Strahls auf den reflektierten und den gebrochenen Strahl. Je größer der Einfallswinkel, je mehr das Verhältnis der Brechungsindices von 1 verschieden, je geringer die Lichtdurchlässigkeit des zweiten Mediums, desto größer ist die Energie des reflektierten Strahls.

4. Von den einzelnen Punkten der sichtbaren Gegenstände gehen Lichtstrahlen aus. Eine i d e a l e o p t i s c h e A b b i l d u n g liegt dann vor, wenn diese Lichtstrahlen wieder in Punkten zum Schnitt gebracht werden. Sie scheinen dann von diesen neuen Punkten, den Bildpunkten, auszugehen und bieten in ihrer Gesamtheit dem Auge das B i l d des Gegenstandes. Auf diese Weise lassen sich die Punkte des Dingraumes den Punkten des Bildraumes zuordnen und umgekehrt. Bei der Verwirklichung der optischen Abbildung durch spiegelnde und brechende Flächen ist diese Zuordnung meistens nicht eindeutig und das entstandene Bild nicht ähnlich.

B. Die Abbildung durch ebene Spiegel

5. Die einzige ideale optische Abbildung ist die durch ebene Spiegel. In Abb. 1 liegt die Zeichenebene senkrecht zur Spiegeloberfläche; in der

Zeichenebene ist ein abzubildender Punkt P angenommen. Für die Ablenkung δ eines beliebigen von P ausgehenden Strahls, der mit dem Einfallslot den Winkel α bildet, folgt aus dem Reflexionsgesetz (1), indem man den nicht abgelenkten Strahl auf dem kürzesten Wege in den abgelenkten überführt

$$\delta = 2\alpha - 180^\circ \quad \ldots\ldots \quad (3).$$

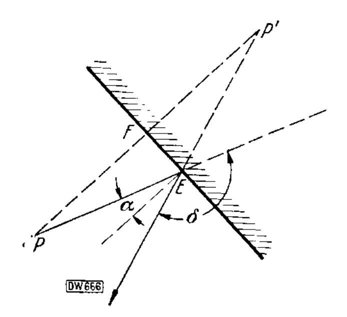


Abb. 1. Abbildung durch einen ebenen Spiegel

Da die Dreiecke EFP und EFP' für alle Einfallswinkel α kongruent sind, schneiden sich die rückwärtigen Verlängerungen aller reflektierten Strahlen wieder in einem Punkte P', dem Spiegelbild von P, und scheinen von ihm auszugehen. Eine Schwenkung des Spiegels um den Winkel $\Delta\alpha$ ändert die Ablenkung um den Winkel $2\Delta\alpha$.

Wendet man Gleichung (3) auf die Reflexion an einem zweiten Spiegel an, der mit dem ersten Spiegel den Winkel β bildet, so wird die Gesamtablenkung

$$\delta_1 + \delta_2 = 2(\alpha_1 + \alpha_2) = 2\beta,$$

d. h. die Richtungsänderung eines Strahls, der auf einen W i n k e l s p i e g e l in einer senkrecht zur Schnittkante liegenden Ebene einfällt, ist gleich dem doppelten Winkel zwischen den Spiegeln und unabhängig vom Einfallswinkel. Für die Richtungsänderung eines einzelnen Strahls, der senkrecht zu dieser Ebene einfällt, wirkt ein Winkelspiegel wie ein einfacher Spiegel, der parallel zur Schnittkante des Winkelspiegels und senkrecht zu seiner Winkelhalbierenden liegt.

6. D a s S p i e g e l b i l d e i n e s a u s g e d e h n t e n G e g e n s t a n d e s ergibt sich nach Abb. 1 aus folgender einfacher Regel: man fällt von jedem Punkt des Gegenstandes das Lot auf die Spiegelfläche und trägt auf der Verlängerung des Lotes den Abstand des abzubildenden Punktes von der Spiegelfläche ab. Bei Winkelspiegeln wiederholt man das Verfahren, indem man den ersten Bildpunkt nunmehr als Dingpunkt behandelt.

Bei der Spiegelung an e i n e r Fläche geht mit dem Bild eines ausgedehnten Gegenstandes eine charakteristische Veränderung vor: eine rechte Hand wird eine linke, eine rechtsgängige Schraube linksgängig usw.: Das Bild wird r ü c k w e n d i g. Durch Spiegelung an einer z w e i t e n Fläche wird diese Veränderung wieder rückgängig, das Bild r e c h t w e n d i g gemacht. Allgemein ist die Abbildung durch eine gerade Zahl von Flächen rechtwendig, durch eine ungerade rückwendig.

Je nach der Lage eines Spiegels oder einer Spiegelgruppe zum Beobachter erscheint der Bildraum aufrecht oder stürzend oder umgekehrt. Ein aufrechtes rückwendiges Bild heißt seitenverkehrt, ein umgekehrtes rückwendiges Bild höhenverkehrt.

Um eine rückwendige Abbildung zu vermeiden, muß die Aufrichtung eines umgekehrten rechtwendigen Bildes und die Ablenkung eines aufrechten rechtwendigen Bildes durch eine gerade Zahl von Reflexionen erfolgen.

7. Spiegel und Winkelspiegel können durch spiegelnde Platten oder durch Prismen verwirklicht werden. In den Prismen findet entweder

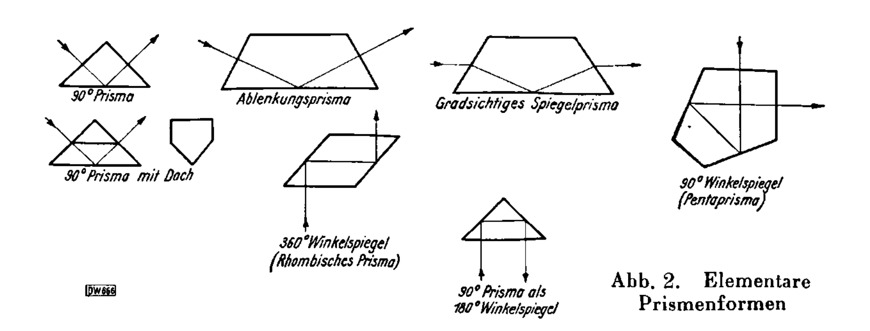


Abb. 2. Elementare Prismenformen

Totalreflexion (Ziff. 3) oder, bei kleinen Einfallswinkeln, Reflexion an einem spiegelnden Belag statt. Die Form der Prismen muß so gewählt werden, daß die Brechung keinen störenden Einfluß auf das Bild ausübt. Die am häufigsten verwendeten Prismenelemente sind in Abb. 2 zusammengestellt. Aus ihnen sind fast alle gebräuchlichen Prismen gebildet.

C. Die Abbildung durch brechende Prismen

8. Wir beschränken uns hier auf Prismen mit kleinem brechenden Winkel, sogenannte Keile. Aus Abb. 3 folgt mit Hilfe des Brechungsgesetzes (2) und bekannter Sätze über Dreiecke für den Winkel δ_0 zwischen einfallendem und austretendem Strahl, wenn das umgebende Medium Luft ist:

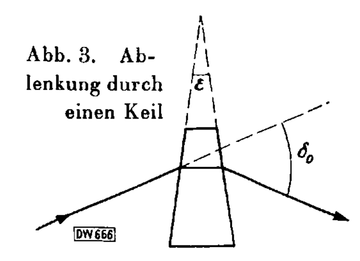


Abb. 3. Ablenkung durch einen Keil

$$\delta_0 = \varepsilon\,(n - 1)\,.$$

Bei der benutzten Näherung für kleine Winkel und nur für diese ist also die Ablenkung unabhängig vom Einfallswinkel. Dreht man einen Keil

um ein Flächenlot als Achse, so beschreibt der gebrochene Strahl einen Kegelmantel.

Bei zwei aufeinanderfolgenden Keilen von gleichem brechenden Winkel, deren Kanten einen beliebigen Winkel φ miteinander bilden, liegt der gebrochene Strahl stets in der Ebene, die durch den einfallenden Strahl und die Winkelhalbierende der Kanten gebildet wird. Dreht man also zwei solche Keile von der Einzelablenkung δ_0 um entgegengesetzt gleiche Winkel φ, so beschreibt der gebrochene Strahl einen ebenen Sektor. Die Gesamtablenkung ist dann

$$\delta = 2\,\delta_0 \cos\frac{\varphi}{2} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (4).$$

D. Die Abbildung durch Kugelflächen

a) Durchrechnung eines einzelnen Strahls

9. Das nächstliegende Mittel zur Untersuchung der Wirkung gekrümmter Flächen ist wieder die Anwendung des Brechungs- und des Reflexionsgesetzes auf einzelne Strahlen. Wir beschränken uns auf brechende Kugelflächen; das Verfahren bei reflektierenden ist dasselbe. Die Bedeutung gerade der Kugelflächen beruht darauf, daß ihre Herstellung wesentlich einfacher ist als die aller anderen gekrümmten Flächen.

Zwei Medien mit den Brechungsindices n und n' seien durch eine Kugelfläche vom Radius r voneinander getrennt, Abb. 4. Wir beziehen alle geometrischen Angaben auf eine zunächst beliebig gewählte Gerade durch den Kugelmittelpunkt, die wir als A c h s e bezeichnen. Die Achse durchstößt die Kugelfläche im F l ä c h e n s c h e i t e l. Auf diese Fläche treffe ein Strahl unter dem Winkel α mit dem Flächenlot. Seine geradlinige Verlängerung treffe die Achse in P unter dem Winkel γ im Abstand s vom Flächenscheitel. Dieser Strahl ist allen Strahlen gleichwertig, die auf einem Kegelmantel mit der Öffnung 2γ und der Spitze in P liegen. Infolge der Brechung schneidet der Strahl aber die Achse in P' unter dem Winkel γ' im Abstand s' vom Flächenscheitel. s und s' heißen Schnittweiten vor und nach der Brechung. Gesucht ist eine Beziehung zwischen s, s', γ und γ'. Aus dem Sinussatz der Trigonometrie, dem Satz vom

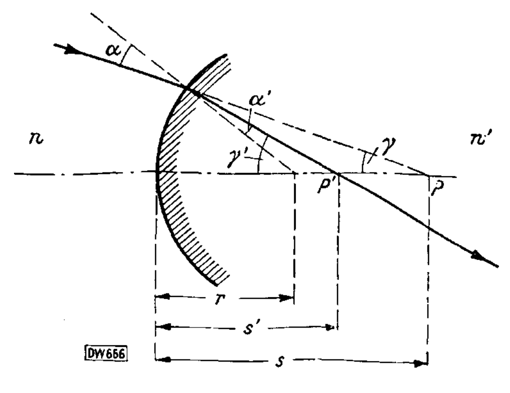


Abb. 4. Abbildung durch Kugelflächen

Außenwinkel und dem Brechungsgesetz (2) ergeben sich folgende vier Gleichungen, in denen, wie im folgenden, alle Strecken positiv im Sinne der Lichtbewegung gerechnet sind.

$$\left.\begin{array}{ll} \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{s - r}{r} & \alpha + \gamma = \alpha' + \gamma' \\ \frac{\sin \alpha'}{\sin \gamma'} = \frac{s' - r}{r} & n' \sin \alpha' = n \sin \alpha \end{array}\right\} \quad \ldots\ldots (5).$$

s' hängt nicht nur von s, sondern auch von γ ab. Die von einem Punkt unter verschiedenen Winkeln γ ausgehenden Strahlen vereinigen sich also im allgemeinen nicht wieder in einem Punkt. Von einer Abbildung in dem unter 4. definierten Sinne kann also noch keine Rede sein.

10. Die Durchrechnung eines Strahls läßt sich ausdehnen auf Folgen von Kugelflächen, die Medien von verschiedenen Brechungsindices voneinander trennen. Man benutzt die Gleichungen (5) und behandelt die Bildpunkte der n-ten Fläche als Dingpunkte der $n + 1$-ten. Bei Berücksichtigung der Abstände d der Flächenscheitel ist also

$$\begin{array}{l} \gamma_{n+1} = \gamma_n' \\ s_{n+1} = s_n' - d_{n,\,n+1} \end{array} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (6).$$

Gehen mehrere Strahlen mit verschiedenen Winkeln γ von einem Punkt aus, so kann man zunächst feststellen, wie die Vereinigung dieser Strahlen nach der Brechung durch mehrere Flächen beschaffen ist, indem man diese Strahlen einzeln durchrechnet. Man kann dann durch Verändern der Krümmungsradien die Vereinigung der Strahlen verbessern. Dies umständliche Verfahren ist in vielen Fällen nicht zu entbehren. Man wird aber zunächst mit Formeln, die für alle Strahlen eines Bündels mit geringer Öffnung in unmittelbarer Nähe der Achse gelten, ein System für eine gegebene Abbildungsaufgabe entwerfen. Dann wird man versuchen, Bedingungen für die Abbildung durch solche Bündel zu erfüllen, die nicht mehr dauernd in der Nähe der Achse verlaufen und schließlich auch weit geöffnet sind. Diese Formeln und Bedingungen sollen im folgenden dargelegt werden.

b) Abbildung durch enge Bündel in der Nähe der Achse

11. Sind die Winkel γ und α, γ' und α' so klein, daß man die Sinus durch die Bogen ersetzen kann, folgt aus den Gleichungen (5)

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (7).$$

Die Schnittweite nach der Brechung hängt also nur noch von der Schnittweite vor der Brechung und den festen Größen n, n' und r ab.

Um das Bild eines kleinen ausgedehnten Gegenstandes von der Schnittweite s zu erhalten, zieht man von den einzelnen Punkten dieses Gegenstandes Strahlen durch den Scheitel der Kugelfläche. Die Schnittpunkte dieser Strahlen mit der achsensenkrechten Ebene von der nach

Gl. 7 berechneten Schnittweite s' liefern die gesuchten Bildpunkte. Bezeichnet man die Ausdehnung von Gegenstand und Bild senkrecht zur Achse mit y und y', so gilt unter Berücksichtigung des für kleine Winkel vereinfachten Brechungsgesetzes

$$\frac{y'}{y} = \frac{s' n}{s n'} = \beta \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (8).$$

β ist der Abbildungsmaßstab.

Da das Konvergenzverhältnis $\frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{s'}{s}$ ist, wird

$$y' \gamma' n' = y \gamma n \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (9).$$

Ist $s = \infty$, nimmt der Bildpunkt s' einen besonderen Wert f' an, die bildseitige Brennweite, in der also ein unendlich (bzw. „sehr weit") entfernter Dingpunkt abgebildet wird:

$$\frac{n'}{f'} = \frac{n' - n}{r} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (10a).$$

Liegt umgekehrt der Dingpunkt im dingseitigen Brennpunkt f, so liegt der zugehörige Bildpunkt im Unendlichen und es gilt

$$\frac{n}{f} = \frac{n - n'}{r} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (10b).$$

12. Ein von zwei Kugelflächen begrenztes System bezeichnet man als Linse. Ist ihre Dicke d und grenzt sie beiderseits an Luft, so folgt für die durch beide Kugelflächen von den Einzelbrennweiten f_1 und f_2 bedingte Brennweite F des Gesamtsystems aus (7) und (10) unter Berücksichtigung von (6) bei Vernachlässigung kleiner Größen

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (11).$$

Diese Gleichung läßt sich auch auf die Berechnung der Gesamtbrennweite eines aus zwei Linsen bestehenden Systems anwenden. Bei „dicken" Linsen bedeutet dabei d den Abstand der einander zugewandten Hauptpunkte (vgl. Ziff. 14).

Bei einer dünnen Linse oder bei zwei Linsen mit verschwindendem Abstand kann man das letzte Glied von (11) vernachlässigen. Ist ihr Brechungsindex n, so gelten nach (7), (8), (10), (11) die einfachen Beziehungen

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad \ldots \ldots \ldots \quad (12),$$

$$\frac{1}{s} - \frac{1}{s'} = \frac{1}{F} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (13),$$

$$\beta = \frac{s'}{s} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (14).$$

Man kann also nach Gl. (12) bei einer dünnen Linse dieselbe Brennweite durch verschiedene Paare von Radien erhalten. Dieses „Durchbiegen" der Linse benutzt man zur Verbesserung der Abbildung.

Aus Gl. (13) und (14) lassen sich die wichtigsten Fälle der Abbildung ablesen. Rückt der Gegenstand aus dem Unendlichen in Richtung auf eine Positivlinse vor, so wandert das Bild in demselben Sinne von der bildseitigen Brennebene weg. Ist die Dingweite gleich der doppelten Brennweite, so ist auch die Bildweite gleich der doppelten Brennweite; der Abbildungsmaßstab wird in diesem Falle gleich eins. Die Bilder aller zwischen Unendlich und der doppelten dingseitigen Brennweite befindlichen Gegenstände liegen also zwischen dem bildseitigen Brennpunkt und der doppelten Brennweite. Umgekehrt liegen die Bilder aller zwischen der doppelten und der einfachen Brennweite liegenden Gegenstände zwischen der doppelten bildseitigen Brennweite und Unendlich. Zu Gegenständen, die innerhalb der dingseitigen Brennweite liegen, gehört kein reelles Bild mehr: Die Strahlen schneiden sich nicht mehr hinter der Linse, sondern ihre rückwärtigen Verlängerungen schneiden sich vor der Linse. Wie das Bild eines Spiegels ist auch dies

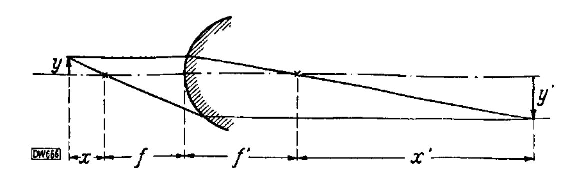


Abb. 5. Zeichnerische Auffindung eines Bildes

Bild nicht auffangbar, es ist „virtuell"; aber wie beim Spiegel handelt es sich auch hier um eine echte Abbildung, nicht um eine mathematische Fiktion. Denn für einen hinter der Linse befindlichen Beobachter (oder optisches Instrument) erscheint an Stelle des Gegenstandes sein Bild, dessen Lage gegenüber dem Gegenstand selbst nach Gl. (13) verändert ist. Rückt schließlich der Gegenstand in den Scheitel der Linse, so fällt er mit seinem Bild zusammen.

Eine entsprechende Betrachtung läßt sich für eine Negativlinse durchführen. Hier sei nur bemerkt, daß Negativlinsen für alle Dingweiten immer virtuelle Bilder liefern.

13. Das Bild eines kleinen ausgedehnten Gegenstandes gewinnt man leicht mit Hilfe eines zeichnerischen Verfahrens. Zeichnet man, Abb. 5, von jedem Punkt des Gegenstandes ausgehend, einen Strahl parallel zur Achse, der also nach der Brechung durch den bildseitigen Brennpunkt gehen muß, und einen Strahl durch den dingseitigen Brennpunkt, der also nach der Brechung parallel zur Achse verlaufen muß, so ist ihr Schnittpunkt das Bild des betreffenden Punktes, die Gesamtheit dieser Schnittpunkte also das Bild des Gegenstandes. In Abb. 5 ist diese Konstruktion für einen einzelnen Punkt

mit einer brechenden Fläche durchgeführt. Man liest aus derselben Figur mit Hilfe ähnlicher Dreiecke ab:

$$x x' = -f f' \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (15),$$

$$\frac{y'}{y} = \beta = \frac{x'}{f'} = \frac{f}{x} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (16).$$

Für Linsen in Luft wird $f = f'$. In Gl. (15) und (16) gehen als Koordinaten von Ding und Bild die Abstände von den bezüglichen Brennpunkten ein, im Gegensatz zu den an sich gleichwertigen Gl. (13) und (14), in die die Schnittweiten eingehen. Für viele Fälle sind die Gleichungen (15) und (16) bequemer, weil sie keine reziproken Größen enthalten und ihre Gültigkeit auch für dicke Linsen behalten.

14. Bei dicken Linsen und bei zusammengesetzten Systemen mit nicht verschwindenden Abständen der Einzelglieder sind die Schnittweiten der Brennpunkte von den Brennweiten ver-

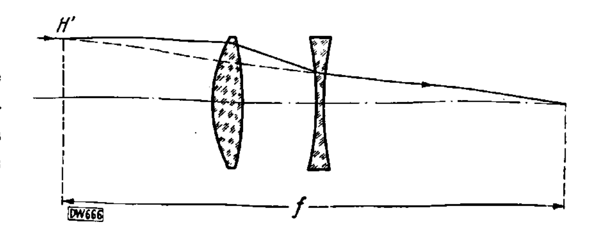


Abb. 6. Zeichnerische Auffindung des bildseitigen Hauptpunktes eines Teleobjektivs

schieden. Diejenigen Punkte auf der Achse, deren Abstand von den Brennpunkten gleich den Brennweiten ist, nennt man Hauptpunkte des Systems. Man findet die Hauptpunkte mittels der aus Abb. 6 für den bildseitigen Hauptpunkt ersichtlichen Konstruktion: Man zeichnet einen achsenparallel einfallenden Strahl durch und sucht den Schnittpunkt H' des einfallenden Strahls oder seiner Verlängerung mit dem nach Verlassen der letzten Fläche zum Brennpunkt strebenden Strahl oder seiner Verlängerung.

15. Für sehr weit entfernte Gegenstände versagt die Konstruktion der Abb. 5 und die aus ihr abgeleiteten Gleichungen. Sehr ferne Gegenstände werden in der Brennebene abgebildet, die die Achse im Brennpunkt schneidet und auf ihr senkrecht steht. Die lineare Ausdehnung y' dieses Bildes ist durch den Winkel σ, unter dem der Gegenstand erscheint und durch die Brennweite f' gegeben:

$$y' = f' \operatorname{tg} \sigma \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (17).$$

Das Bild ist also bei gleicher Winkelausdehnung des Gegenstands um so größer, je größer die Brennweite ist. Von einem Abbildungsmaßstab oder einer Vergrößerung kann man hier aber noch nicht sprechen. Der letztere Begriff ist erst dann anzuwenden, wenn es wie beim Fernrohr

gelingt, das Bild y' unter einem größeren Winkel σ' erscheinen zu lassen als den Gegenstand.

c) Strahlenbegrenzung, Strahlenvermittlung, Auffangschirm

16. Bevor wir die Eigenschaften der Abbildung unter allgemeinen Bedingungen untersuchen, müssen wir sie nach einem anderen Gesichtspunkt betrachten.

Wir denken uns das Auge an den Ort eines auf der Achse gelegenen Dingpunktes gebracht. Dann erscheint von den Blenden des abbildenden Systems eine als die kleinste. Es ist entweder eine greifbare Blende oder das Bild einer solchen, wenn sie im Innern des Systems liegt und durch die zwischen Blende und Auge befindlichen Teile des Systems abgebildet wird. Die körperliche Blende selbst heißt Öffnungsblende, ihr dingseitiges durch die entsprechenden Teile des Systems erzeugtes Bild Eintrittspupille, ihr bildseitiges Bild Austrittspupille des Systems. Die Öffnungsblende bestimmt den Öffnungswinkel des einen Achsenpunkt abbildenden Strahlenkegels, bzw. bei unendlich fernen Dingpunkten den Durchmesser des abbildenden Strahlenbündels. Die Eintrittspupille ist das Zentrum der Perspektive für den Dingraum, die Austrittspupille für den Bildraum. Die durch die Mitte der Eintrittspupille gehenden Strahlen heißen Hauptstrahlen. Sie sind die Achsen der die einzelnen Punkte eines ausgedehnten Gegenstandes abbildenden Bündel. Das Verhältnis des Durchmessers der Eintrittspupille zur Brennweite eines Systems bezeichnet man als Öffnungsverhältnis.

Wir denken uns nun das Auge in die Mitte der Eintrittspupille gebracht und in Richtung des Bildes blickend. Dann erscheint wieder eine von den vorhandenen Blenden oder ihr Bild als die kleinste. Die körperliche Blende selbst heißt Gesichtsfeldblende, ihr durch die dingseitigen Teile des Systems entworfenes Bild Eintrittsluke, ihr durch die bildseitigen Teile des Systems entworfenes Bild Austrittsluke.

Durch das Zusammenwirken von Eintrittspupille und Eintrittsluke wird der Dingraum in drei Gebiete aufgeteilt: eins, für dessen sämtliche Punkte die volle Öffnung wirksam ist, eins, für das in abnehmendem Maße nur noch Teile der Öffnung wirksam sind, eins, das überhaupt nicht mehr abgebildet wird. Den Winkelbereich der überhaupt noch zur Abbildung kommenden Dinge bezeichnet man als Gesichtsfeldwinkel.

17. Maßgebend für die Helligkeit des Bildes ist zunächst die vom System aufgenommene Energie, also die Eintrittspupille. Das gilt aber bei Instrumenten in Verbindung mit dem Auge nur solange, als ihre Austrittspupille kleiner ist als die Augenpupille. Wird die Austrittspupille größer, ist die Augenpupille selbst Öffnungsblende.

Das Verhältnis der Bildhelligkeiten auf der Netzhaut bei freiem und bewaffnetem Auge ist dadurch bestimmt, daß bei freiem Auge die ganze Augenpupille wirksam ist, bei bewaffnetem Auge nur ein Teil von der Größe der Austrittspupille des Instruments, also höchstens wieder die ganze Augenpupille. Außer diesen Verlusten durch die Strahlenbegrenzung sind noch die Verluste zu berücksichtigen, die die Strahlen auf ihrem Wege durch das System durch Reflexion und Absorption erleiden. *Die Bilder ausgedehnter Gegenstände sind auf der Netzhaut des bewaffneten Auges dunkler als auf der des unbewaffneten.* In diesem Fall ist die Helligkeitsempfindung durch die *Flächenhelligkeit* bestimmt. Die Helligkeitsempfindung nimmt jedoch in der Dämmerung auch mit der Vergrößerung zu.

Beides gilt nicht mehr für Bilder von Gegenständen sehr geringer Ausdehnung, z. B. von Fixsternen. *Ihre Helligkeit erscheint gegenüber dem freien Sehen im Verhältnis der Eintrittspupille des Instruments zur Augenpupille vergrößert.* Da nämlich solche Bilder gewissermaßen von *einem* Netzhautelement aufgenommen werden, ist die durch sie erregte Helligkeitsempfindung nicht mehr durch die Flächenhelligkeit, sondern durch den *Lichtstrom* bestimmt.

18. Durch Gl. (13) bzw. (15) wird jedem Dingpunkt ein Bildpunkt zugeordnet und umgekehrt. Wir greifen jetzt willkürlich eine Bildebene heraus und fragen uns, wie Gegenstände die außerhalb der zugeordneten Dingebene liegen, in dieser Ebene abgebildet werden. Die dieser als fest angenommenen Bildebene, die auch *Mattscheibenebene* genannt wird, nach Gl. (13) zugeordnete Dingebene heißt *Einstellebene.* Die in dieser Ebene liegenden Punkte werden jedenfalls in der Mattscheibenebene scharf abgebildet. Einen außerhalb der Einstellebene liegenden Dingpunkt denken wir uns dadurch in die Einstellebene projiziert, daß er mit allen Punkten der Eintrittspupille verbunden wird: Die so entstehenden Strahlen oder ihre Verlängerungen durchstoßen die Einstellebene in einer *Zerstreuungsfigur.* Da die projizierenden Strahlen zugleich die für die Abbildung im Instrument wirksamen sind, *erscheint als Bild des außerhalb der Einstellebene liegenden Punktes in der Mattscheibenebene das Bild seiner Zerstreuungsfigur.* Ist die Ausdehnung dieses Bildes klein, so ist es einem scharfen Bild des Punktes in einer ihm zugeordneten Bildebene gleichwertig. Man erhält so eine gewisse *Schärfentiefe* der Abbildung: nicht nur die in der Einstellebene liegenden Gegenstände, sondern auch ein Teil des Dingraums vor und hinter ihr wird in die Mattscheibenebene mit hinreichender Schärfe abgebildet. Die Tiefe dieses Raumteiles hängt nach dem Gesagten nur von dem Abstand der Einstell-

ebene von der Eintrittspupille und vom Durchmesser der Eintrittspupille ab. Je weiter entfernt die Einstellebene, je kleiner der Durchmesser der Eintrittspupille, je geringer die Vergrößerung mit der das Bild betrachtet wird, desto tiefer ist der abgebildete Raumteil. Bei einem normalen Feldstecher z. B. beginnt er etwa 50 m vor dem Objektiv und reicht bis ins Unendliche.

d) Abbildung durch weite Bündel beliebiger Neigung zur Achse

19. Wir lassen jetzt schrittweise die einschränkenden Voraussetzungen des Absatzes b) fallen. Dabei verzichten wir auf mathematische Darstellung, die ihren Ausgang von der Reihenentwicklung der Sinus in Gl. (5) nehmen müßte. Zunächst betrachten wir die Abbildung eines Achsenpunktes durch weitgeöffnete Bündel. Die unter verschiedenen Winkeln von der Achse ausgehenden, bzw. in verschiedener Höhe einfallenden Strahlen schneiden nach der Brechung die Achse in verschiedenen Abständen; andere Schnittpunkte der Strahlen miteinander liegen außerhalb der Achse. Das Bild eines unendlich fernen Punktes ist also streng genommen die Einhüllende aller gebrochenen Strahlen, die sogenannte Brennfläche oder Kaustik. Diesen Fehler bezeichnet man als sphärische Abweichung. Fängt man ein mit sphärischer Abweichung behaftetes Bild auf einem Schirm auf, so erscheint zwar auf ihm ein Bild des Gegenstandes. Sein Rand ist aber von einem Schleier überdeckt, der von denjenigen Strahlen herrührt, die sich vor oder hinter der Bildebene schneiden.

20. Nunmehr rücke der Objektpunkt aus der Achse; er werde zunächst durch ein nur wenig geöffnetes Bündel abgebildet. Durch den schiefen Einfall des Bündels auf die brechende Fläche verliert sein Querschnitt die Kreisform. Die Achsen des gebrochenen Bündels zeigen zwei bevorzugte Schnitte an: Die ebenen Büschel in diesen beiden Hauptschnitten des gebrochenen Bündels vereinigen sich nicht in einem Punkt, sondern in zwei verschiedenen Schnittweiten zu kurzen „Brennlinien", die aufeinander senkrecht stehen. Diese Erscheinung heißt Astigmatismus. Fängt man ein astigmatisches Büschel auf einem achsensenkrechten Schirm auf, der längs der Achse verschoben wird, so erscheint der Querschnitt des Bündels nacheinander kreisförmig, elliptisch, zu einer Linie zusammengezogen, elliptisch, kreisförmig, wieder elliptisch jedoch mit um 90° gedrehter großer Achse, wieder zu einer Linie zusammengezogen, die senkrecht zur ersten liegt, elliptisch, kreisförmig.

21. Das geöffnete schiefe Bündel ist auch bei Abbildung eines außer der Achse gelegenen Punktes mit sphärischer Abweichung behaftet. Die schon durch die Schiefe des Einfalls astigmatischen Bilder werden noch weiter verschlechtert: An Stelle der geraden Brenn-

linien erscheinen mit Schleiern überdeckte schweifförmige Figuren. Diese Erscheinung heißt Koma. Bei komafreier Abbildung eines kleinen achsensenkrechten Flächenstücks durch beliebig geöffnete Bündel muß

$$\frac{n \sin \gamma}{n' \sin \gamma'} = \beta \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (18)$$

sein.

Offenbar kann diese Sinusbedingung nur für eine Dingweite erfüllt werden. Ist das abbildende System für diese Dingweite außerdem frei von sphärischer Abweichung, so wird es als aplanatisch bezeichnet. Jede einzelne Kugelfläche besitzt immer ein aplanatisches Punktpaar. Diese Tatsache läßt sich leicht aus den Gl. (5) ableiten.

Für beliebige Dingweiten lassen sich sphärische Abweichung, Astigmatismus und Koma einfacher Linsen mittels Durchbiegens (vgl. Ziff. 12) erheblich vermindern.

22. Wir lassen jetzt die letzte Einschränkung fallen und betrachten die Abbildung ausgedehnter Gegenstände durch beliebig geöffnete Bündel. Die Bilder sollen eindeutig (d. h. „scharf"), und geometrisch ähnlich sein. Zur scharfen Abbildung muß zunächst in den einzelnen Bildpunkten die Strahlenvereinigung gut, d. h. frei von sphärischer Abweichung, Astigmatismus und Koma sein. Weiter müssen alle der Einstellebene zugeordneten Bildpunkte in einer achsensenkrechten Ebene liegen. Ist dies nicht der Fall, spricht man von Bildfeldwölbung. Die Bedingung für die Ebnung des Bildfeldes heißt Petzvalbedingung und lautet

$$\Sigma \frac{1}{r_i} \left(\frac{1}{n_i} - \frac{1}{n_{i-1}} \right) = 0 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (19),$$

bzw. für ein System aus einer Anzahl dünner Linsen in Luft

$$\Sigma \frac{1}{n_i f_i} = 0 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (19a).$$

Die Petzvalbedingung ist im Gegensatz zur Sinusbedingung nicht vom Dingabstand abhängig. Sie kann aber durch eine endliche Brennweite nicht erfüllt werden: Zur Ebnung des Bildfeldes sind immer mehrere Linsen erforderlich.

23. Bei der einfachen und bei mehreren verkitteten Linsen ist das Bild dem Ding nicht geometrisch ähnlich. Man spricht in diesem Fall von Verzeichnung: Der Abbildungsmaßstab β in den äußeren und inneren Teilen des Bildes ist verschieden. Ausgehend von der Verzeichnung eines quadratischen Netzes nennt man die Verzeichnung tonnenförmig, wenn in den äußeren Bildteilen β kleiner als in der Mitte ist, kissenförmig, wenn in den äußeren Bildteilen β größer als in der Mitte ist. Die Bedingung für Verzeichnungsfreiheit lautet

$$\frac{n \operatorname{tg} \gamma}{n' \operatorname{tg} \gamma'} = \beta \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (20),$$

wenn die von der Mitte der Eintrittspupille bzw. der Austrittspupille nach entsprechenden Punkten des Gegenstandes bzw. des Bildes zielenden Hauptstrahlen die Winkel γ und γ' mit der Achse bilden. Diese Bedingung hat also dieselbe Gestalt wie die Sinusbedingung Gl. (18), nur daß an Stelle des Sinus der Tangens erscheint: Beide Bedingungen können gleichzeitig nur für kleine Winkel γ erfüllt werden. Bei einer aplanatischen und verzeichnungsfreien Abbildung müssen die ein Flächenelement abbildenden Büschelstrahlen der Sinusbedingung, die von den verschiedenen Elementen einer ausgedehnten Fläche herkommenden Hauptstrahlen der Tangensbedingung genügen.

e) Die Farbenabweichungen

24. Der Brechungsindex n hängt von der Farbe des Lichtes ab. Diese Abhängigkeit heißt Dispersion. Sind $n_C < n_D < n_F$ die Brechungsindices eines bestimmten Glases für rotes, gelbes und grünes Licht, so ist die Größe $\frac{n_F - n_C}{n_D - 1}$ ein Maß für die Dispersion. Der Kehrwert dieser Größe $\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$ heißt Abbesche Zahl; sie ist neben dem Brechungsindex n_D die wichtigste eine Glassorte kennzeichnende Zahl.

Wegen der Dispersion von n weisen auch alle bisher behandelten Bestimmungsstücke der Abbildung Dispersion auf, insbesondere die Brennweite, die Vergrößerung und die Bildfehler. Will man sich nicht mit Hilfe von Filtern auf eine Farbe beschränken, sondern weißes Licht zur Abbildung benutzen, muß man die Abbildung unabhängig von der Farbe machen. Die Abhängigkeit der Brennweite von der Änderung des Brechungsindex mit der Farbe erhält man durch Differentiation der Gl. (12) mit $\frac{df}{f} = \frac{dn}{n-1}$. Setzt man $dn = n_F - n_C$, so wird $\frac{df}{f} = \frac{1}{\nu}$.

Verlangt man nur, daß die Größe des Bildes, das von zwei dünnen in Luft befindlichen Linsen mit endlichem Abstand entworfen wird, für zwei Farben gleich ist, so müssen nach Gl. (16) die Brennweiten des betreffenden Systems für diese beiden Farben gleich sein. Differentiation der Gl. (11) ergibt für eine feste Gesamtbrennweite

$$\frac{d \cdot df_1}{f_1^2 f_2} + \frac{d \cdot df_2}{f_1 f_2^2} - \frac{df_1}{f_1^2} - \frac{df_2}{f_2^2} = 0 \quad \ldots \ldots \quad (21).$$

Bei Verwendung gleicher Glassorten für beide Linsen, also für $\nu_1 = \nu_2$ bzw. $\frac{df_1}{f_1} = \frac{df_2}{f_2}$ wird

$$d = \frac{1}{2}(f_1 + f_2) \quad \ldots \ldots \quad (22).$$

Der Abstand der beiden Linsen muß gleich dem arithmetischen Mittel ihrer Brennweiten sein.

25. Um außer der Größe auch die Lage eines Bildes unabhängig von der Farbe zu machen, muß bei Verwendung dünner Linsen ihr Abstand verschwindend klein sein, damit die Brennweiten gleich den Schnittweiten der Brennpunkte werden. Gl. (22) ist also nicht mehr anwendbar. Man muß dann auf die Verwendung gleicher Glassorten verzichten. Setzt man in Gl. (21) $d = o$, so erhält man als Bedingung für gleiche Lage und Größe der Bilder bei zwei Farben

$\frac{d f_1}{f_1^2} + \frac{d f_2}{f_2^2} = 0$ und mit $\frac{f}{d f} = \nu$

$$\nu_1 f_1 + \nu_2 f_2 = 0 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (23).$$

Die Systeme, die dieser Bedingung genügen, heißen Achromate. Die beiden Linsen müssen verschiedene Dispersion besitzen und eine muß sammelnd, die andere zerstreuend sein. Soll die Brennweite des Gesamtsystems positiv sein, so muß die Brennweite der Sammellinse ihrem Betrag nach kleiner sein als die der Zerstreuungslinse. Nach Gl. (23) muß aber dann die Zerstreuungslinse die stärkere Dispersion haben (kleineres ν). Zur Erfüllung der Petzvalbedingung Gl. (19) muß aber bei einem derartigen System der Brechungsindex der Sammellinse größer sein als der der Zerstreuungslinse. Die gleichzeitige Erfüllung beider Bedingungen setzt also Gläser voraus, die trotz höherer Dispersion kleineren Brechungsindex haben als solche mit niedrigerer Dispersion.

Außer den Brennweiten und den Lagen der Hauptpunkte hängen auch alle besprochenen Bildfehler von der Farbe ab, d. h. wenn sie für eine Farbe beseitigt sind, sind sie für eine andere noch vorhanden. Das macht sich besonders unangenehm bemerkbar bei der sphärischen Abweichung von Systemen mit großem Öffnungsverhältnis. Systeme, die für mindestens zwei Farben aplanatisch sind und für drei Farben gleiche Brennweite haben, heißen Apochromate.

26. Aus den vorigen Abschnitten ergibt sich, daß es unmöglich ist, die in Ziff. 4 definierte ideale Abbildung des ganzen Dingraumes durch Kugelflächen zu verwirklichen. Die Schärfentiefe ist begrenzt und die Bildfehler lassen sich nur für eine bestimmte Lage der Einstellebene und nicht alle zugleich beheben. Bei der Berechnung eines Systems muß man daher von den besonderen Ansprüchen der gestellten Aufgabe ausgehen. So spielt die sphärische Abweichung bei kleinem Öffnungsverhältnis keine Rolle; bei kleinem Gesichtsfeld ist kein Astigmatismus zu befürchten usf. Schließlich gibt es für den Grad, bis zu dem die Zerstreuungsfiguren verschwinden und die Bildfehler tatsächlich behoben werden müssen, eine allgemeine Grenze: Da jedes Bild einmal auf einem Schirm aufgefangen wird, sei es die photographische Platte,

eine Projektionswand oder die Netzhaut des Auges, ist es unnötig, Einzelheiten abzubilden, die feiner sind als die Strukturelemente des Auffangschirms.

Das Fernrohr im allgemeinen

27. Ein Fernrohr bildet ferne Gegenstände in ferne Bilder ab, die dem Beobachter in der Regel unter größerem Winkel erscheinen als die Gegenstände selbst. Das Auge sieht dabei auf Ferne eingestellt durch das Instrument hindurch. Das Fernrohr ist also eine Abbildungsfolge, deren dingseitiger und bildseitiger Brennpunkt im Unendlichen liegen. Setzt man demgemäß in Gl. (11) für die Gesamtbrennweite zweier Abbildungselemente, deren jedes aus einer oder mehreren Linsen bestehen kann, $F = \infty$, so wird

$$d = f_1 + f_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (24).$$

Der Abstand der beiden abbildenden Elemente in Luft ist gleich der Summe ihrer Brennweiten. Ein Brennpunkt des einen Elements fällt mit einem Brennpunkt des anderen zusammen. Das erste Element, bzw. die Gesamtheit der vorderen Linsen, bis zu der Stelle, wo der Querschnitt eines achsenparallel einfallenden Bündels etwa die Größe der Austrittspupille hat, bezeichnet man als Objektiv. Das zweite Element bzw. die Gesamtheit der übrigen Linsen als Okular.

Ein Hauptstrahl durchsetze die Mitte der Eintrittspupille einer derartigen Folge unter dem Winkel γ zur Achse. Der Hauptstrahl verläßt das Objektiv unter demselben Winkel γ zur Achse und wird vom Okular wieder zur Achse hingebrochen, die er unter dem Winkel γ' schneidet. In diesem Schnittpunkt liegt als Bild der Eintrittspupille die Austrittspupille. Nach Gl. (9) gilt für $n = n' = 1$, wenn y und y' die Durchmesser von Eintrittspupille und Austrittspupille bedeuten

$$\frac{\gamma'}{\gamma} = \frac{y}{y'} = \Gamma \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (25).$$

Ein Gegenstand, der dem freien Auge am Ort der Eintrittspupille in der Winkelgröße γ erscheint, erscheint dem bewaffneten Auge am Ort der Austrittspupille des Fernrohrs unter dem Winkel γ'.

Die (Winkel-)Vergrößerung Γ des Fernrohrs (in den Pupillen) ist gleich dem Verhältnis der Pupillendurchmesser.

Andererseits gilt nach Gl. (16) und (25) mit $x' = f_1$ und $f = f_2$

$$\Gamma = \frac{f_1}{f_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (26),$$

d. h. die Fernrohrvergrößerung ist gleich dem Verhältnis der Brennweiten von Objektiv und Okular.

28. In der Brennebene des Objektivs entsteht ein Bild des Gegenstandes, das durch das Okular betrachtet wird. Die Wirkung des Okulars ist ähnlich der einer Lupe. Sie unterscheidet sich von der einer Lupe dadurch, daß zur Abbildung durch ein Okular nur gewisse begrenzte Strahlenbündel dienen können. Um diese Bündel in die Austrittspupille des Fernrohrs und damit ins Auge zu bringen, müssen häufig Hilfsmittel in den Okularen angewandt werden. Ein optisches Element, das mehr auf die Hauptstrahlen als auf das Bild wirkt, nennt man Kollektiv. Die Augenlinse des Okulars dagegen wirkt hauptsächlich auf das Bild. Häufig bildet das Kollektiv die Eintrittspupille etwas hinter die Augenlinse ab, während die Augenlinse das Zwischenbild ins Unendliche abbildet (vgl. Abb. 7 und 10).

29. Gl. (24) kann auf zwei grundsätzlich verschiedene Weisen befriedigt werden. Das astronomische Fernrohr besteht aus zwei sammelnden Systemen; der hintere Brennpunkt des Objektivs fällt mit dem vorderen des Okulars zusammen und an dieser Stelle entsteht ein reelles umgekehrtes Bild. Beim holländischen Fernrohr ist das Objektiv sammelnd, das Okular zerstreuend. Wieder fällt der hintere Brennpunkt des Objektivs mit dem vorderen des Okulars zusammen. Da aber der vordere Brennpunkt der Negativlinse im Sinne der Lichtbewegung hinter ihr liegt, entsteht kein reelles Zwischenbild, das beobachtete virtuelle Bild ist aufrecht.

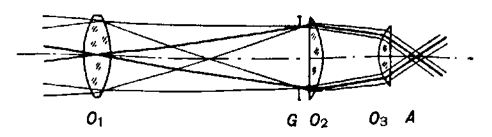


Abb. 7. Strahlengang beim astronomischen Fernrohr

30. Der Strahlengang in einem schematischen astronomischen Fernrohr ist in Abb. 7 dargestellt. Die Eintrittspupille ist durch das Objektiv O_1 gegeben; die Austrittspupille A ist ihr reelles vom Okular $O_2\,O_3$ hinter der Augenlinse entworfenes Bild. Sie erscheint als heller Kreis über dem Okular. Die Gesichtsfeldblende ist meistens eine in die Ebene des Zwischenbildes G gebrachte körperliche Blende. Der Gesichtsfeldwinkel ω (vgl. Ziffer 16) auf der Dingseite ist nach Gl. (17) gegeben durch $\operatorname{tg}\frac{\omega}{2}=\frac{b}{f_1}$, auf der Bildseite durch $\operatorname{tg}\frac{\omega'}{2}=\frac{b}{f_2}$, wo b der Radius der Gesichtsfeldblende ist. Näherungsweise kann man unter Benutzung von Gl. (26) die Fernrohrvergrößerung

$$\Gamma=\frac{\omega'}{\omega}$$

setzen. ω' ist durch das Okular gegeben. Bei vorgeschriebener Vergrößerung Γ ist das dingseitige Gesichtsfeld grundsätzlich nur durch die Hebung der Bildfehler des Okulars beschränkt.

Für die Lichtstärke des astronomischen Fernrohrs ist folgendes zu beachten. (Vgl. Ziff. 17). Die Größe der Austrittspupille ist oft kleiner als die Augenpupille. Der dadurch bedingte Verlust ist besonders groß, wenn die Augenpupille in der Dunkelheit bis 8 mm gegenüber 2 bis 3 mm am Tage vergrößert ist. Umgekehrt wird ein Nachtglas mit großer Austrittspupille und entsprechend großem Objektivdurchmesser am Tage nicht ausgenutzt. Die Glasverluste sind bei dem komplizierten Bau der Okulare (siehe Ziff. 37) und bei dem Vorhandensein von Mitteln zur Bildaufrichtung größer als beim holländischen Fernrohr.

Ist die Austrittspupille klein, so wird sie bei größeren Augenbewegungen abgeschnitten. Um das Gesichtsfeld zu überblicken, muß man daher Kopfbewegungen zu Hilfe nehmen. Große Austrittspupillen haben also auch den Vorteil, daß bei ihnen ohne große Kopfbewegungen beobachtet werden kann.

Die Bilder astronomischer Fernrohre können entweder durch ein bildaufrichtendes Okular oder durch mehrere Spiegelungen aufgerichtet werden.

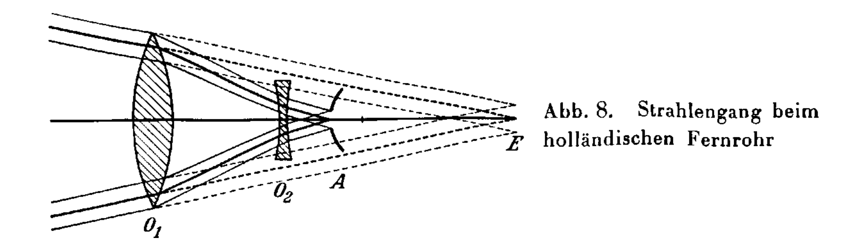


Abb. 8. Strahlengang beim holländischen Fernrohr

31. Der Strahlengang in einem schematischen holländischen Fernrohr in Verbindung mit dem Auge ist in Abb. 8 dargestellt. Als kleinste vom Dingraum sichtbare Blende entsprechend Ziff. 16 ist bei ruhendem Auge die Eintrittspupille des Auges die Austrittspupille A des holländischen Fernrohrs. Seine Eintrittspupille findet man, indem man nacheinander das durch das Okular entworfene Bild der Austrittspupille und das durch das Objektiv entworfene Bild dieses Bildes konstruiert: Die Eintrittspupille E liegt hinter dem Auge. Die engste von der Mitte der Eintrittspupille sichtbare Blende ist die Objektivfassung O_1; durch sie wird das Gesichtsfeld begrenzt. Das vom Okular O_2 entworfene Bild der Objektivfassung, die Austrittsluke des holländischen Fernrohrs, liegt zwischen Objektiv und Okular; das Bild ferner Gegenstände erscheint daher nicht scharf begrenzt und besitzt nur in der Mitte des Gesichtsfeldes volle Helligkeit.

Der Schnittpunkt der Hauptstrahlen für das bewegte Auge ist der Augendrehpunkt, der somit bei bewegtem Auge die Mitte der Austrittspupille des Instruments darstellt. Wiederholt man die eben angegebene Konstruktion für diesen Fall, so ergibt sich eine noch weiter hinter dem Auge liegende Eintrittspupille und dementsprechend ein noch kleineres Gesichtsfeld. Trotzdem ist die Beobachtung mit blickendem Auge sehr angenehm, weil der Beobachter dabei gewissermaßen die Austrittspupille mitnimmt.

Da die Augenpupille immer Öffnungsblende des holländischen Fernrohrs ist, ist die Lichtstärke (Ziff. 17) gegenüber der des unbewaffneten Auges nur vermindert durch die hier sehr geringen Glasverluste. Das holländische Fernrohr ist daher besonders als Nacht- und Theaterglas geeignet. Andererseits ist die Gesichtsfeldbegrenzung durch den Objektivrand nur bei schwachen Vergrößerungen tragbar; stärkere Vergrößerungen erfordern zur Erhaltung des Gesichtsfeldwinkels ein zu großes Öffnungsverhältnis des Objektivs. — Weil das reelle Zwischenbild fehlt, können keine Strichmarken angebracht werden.

Die Elemente des Fernrohraufbaus

Objektiv und Okular

32. Die Aufgabe der Abbildung durch das Fernrohr ist auf Okular und Objektiv verteilt, ebenso die Hebung der Bildfehler. Weicht die Winkelvergrößerung erheblich von 1 ab, ist nach Gl. (26) die Brennweite des Objektivs erheblich größer als die des Okulars. Die seitliche Ausdehnung des vom Objektiv entworfenen Bildes ist im Verhältnis zu seiner Brennweite klein; dagegen besitzt das Okular bei geringer Brennweite einen großen Gesichtsfeldwinkel. Demnach ist das Objektiv vor allem von den von der Öffnung abhängenden Fehlern zu befreien, nämlich von sphärischer Abweichung und Koma, außerdem von der Farbenabweichung der Brennweite. Das Okular ist dagegen zunächst von den vom Gesichtsfeldwinkel abhängenden Fehlern zu befreien, nämlich von Astigmatismus, Bildfeldwölbung, Verzeichnung und der Farbenabweichung der Vergrößerung. Nur bei schwachen Vergrößerungen werden Objektiv und Okular gemeinsam korrigiert.

a) Die Objektive

33. Das achromatische Objektiv (vgl. Ziffer 25) besteht aus zwei durch einen dünnen Zwischenraum getrennten Linsen aus gewöhnlichen Gläsern, einer sammelnden aus Kronglas und einer zerstreuenden aus Flintglas. Die geringere Krümmung ist dem Bild zugewandt und befindet sich am Flintglas. Mit derartigen Objektiven läßt sich die sphärische und die farbige Abweichung beseitigen und die Sinusbedingung (Gl. 18) erfüllen. Macht man die inneren Radien

gleich, um die beiden Linsen zur Minderung der Lichtverluste verkitten zu können, müssen zur Erfüllung der Sinusbedingung besondere Glassorten genommen werden.

Durch diese Glassorten kann auch die Farbenfreiheit noch erheblich verbessert werden. Statt die Sinusbedingung zu erfüllen, die nur bei ausgedehnterem Gesichtsfeld Bedeutung hat, kann man die sphärische Abweichung für zwei Farben beseitigen. Das Öffnungsverhältnis, das man bei stärkeren Vergrößerungen mit derartigen Objektiven erreichen kann, beträgt bei kleinen Objektivdurchmessern etwa 1 : 4, bei großen 1 : 18.

Um ein größeres Öffnungsverhältnis bei stärkeren Vergrößerungen und größerem Durchmesser zu erreichen, muß man zu Objektiven mit drei Linsen übergehen, von denen zwei verkittet sind. Auf diese Weise läßt sich das Öffnungsverhältnis bis 1 : 12 steigern. Soll außerdem noch ein großes Gesichtsfeld ausgezeichnet werden, muß man vier Linsen nehmen.

34. Um das Fernrohr zu verkürzen, bzw. bei gleicher Gesamtvergrößerung die Brennweite des Okulars zu verlängern, wendet man das Teleobjektiv an. Es besteht aus einem sammelnden Vorderglied und einem zerstreuenden Hinterglied mit Luftabstand. Man kann sich das Teleobjektiv entstanden denken aus einem holländischen Fernrohr, bei dem der Abstand der beiden Linsen so verringert ist, daß es die gewünschte endliche Brennweite erhält. Der bildseitige Hauptpunkt einer derartigen Kombination liegt im Dingraum erheblich vor dem ersten Glied, vgl. Abb. 7.

35. Spiegelobjektive sind von selbst frei von Farbfehlern. Die sphärische Abweichung kann dadurch beseitigt werden, daß man von der Kugelgestalt abgeht und die Form wählt, die die Vereinigung aller achsenparallel einfallenden Strahlen in einem Punkt gewährleistet, das Paraboloid. Dabei ist aber die Sinusbedingung nicht erfüllbar: das Bild ist nur innerhalb eines kleinen Gesichtsfeldwinkels frei von Koma. Eine Verbesserung der Bildgüte kann durch Objektive erzielt werden, die aus zwei von der Kugelgestalt abweichenden Spiegeln bestehen, (vgl. Ziff. 42).

36. Unter dem Auflösungsvermögen eines Objektivs versteht man den kleinsten Winkelabstand zweier punktförmiger Gegenstände, bei dem gerade noch eine Trennung der Bilder durch ein Okular von hinreichend starker Vergrößerung möglich ist. Man kommt hier in einen Größenbereich, für den die in Ziff. 3 gemachte Voraussetzung nicht mehr zutrifft; es ist also notwendig, auf die Wellennatur des Lichtes Rücksicht zu nehmen. Durch Beugung der einfallenden Lichtwellen an der Objektivöffnung entsteht nämlich in der Bildebene ein Bild, dessen Ausdehnung und Struktur nicht nur durch Größe, Form und Helligkeitsverteilung des Gegenstandes, sondern auch durch

Größe, Form und Lichtdurchlässigkeit der Objektivöffnung bestimmt ist. Das Beugungsbild eines punktförmigen Gegenstandes ist um so ausgedehnter, das Auflösungsvermögen des betreffenden Objektivs also um so geringer, je kleiner das Öffnungsverhältnis dieses Objektivs und je größer die für die Abbildung wirksame Lichtwellenlänge ist. Durch das Auflösungsvermögen von Objektiv und Auge ist also eine gewisse Grenze für die nutzbare Vergrößerung gegeben, die dann erreicht ist, wenn die durch das Objektiv aufgelösten Winkel so stark vergrößert sind, daß sie auch vom Auge aufgelöst werden; über diese Grenze hinaus bringt bei gegebenem Öffnungsverhältnis des Objektivs eine weitere Okularvergrößerung keinen Gewinn mehr an Bildeinzelheiten.

b) Okulare

37. Das Huygens'sche Okular, vgl. Abb. 10, besteht aus zwei einfachen, häufig plankonvexen, getrennten Sammellinsen, die ebene Seite dem Auge zugewandt; es erfüllt die Bedingung (22) für eine von der Farbe unabhängige Brennweite. Die Bildebene befindet sich zwischen den beiden Linsen; der Rand des Gesichtsfeldes wird also nicht farbenfrei abgebildet. Durchbiegen der Linsen beseitigt für ein mäßig großes Gesichtsfeld entweder den Astigmatismus oder die Bildfeldwölbung.

Das Ramsden'sche Okular, vgl. Abb. 7, besteht in seiner Urform ebenfalls aus zwei Sammellinsen gleicher Brennweite, die um den Abstand ihrer Brennweite voneinander getrennt sind; es erfüllt also ebenfalls die Bedingung (22). Die Bildebene befindet sich aber am Kollektiv. Um die Austrittspupille dem Auge besser zugänglich zu machen, muß man den Abstand der beiden Linsen verringern; die dadurch verloren gegangene Achromasie der Brennweite kann wieder gewonnen werden, wenn man die Augenlinse aus zwei verkitteten Linsen zusammensetzt, die der Bedingung (23) genügen. Man erhält so das Kellnersche Okular. Bei diesem beträgt das verzeichnungsfreie Gesichtsfeld etwa 30°.

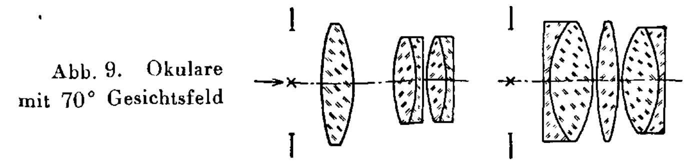


Abb. 9. Okulare mit 70° Gesichtsfeld

Um größere auskorrigierte Gesichtsfelder und bei kurzer Brennweite größere Abstände der Austrittspupille von der letzten brechenden Fläche des Okulars zu erhalten, muß man die Zahl der Linsen erhöhen. Mit den sogenannten orthoskopischen Okularen wird ein Gesichtsfeld von 50° erreicht, mit fünflinsigen Okularen bis 70°, Abb. 9.

38. Nur beim Normalsichtigen ist bei entspannter Akkomodation das Auge auf Unendlich eingestellt. Nur für diesen oder einen durch Brille vollkorrigierten Fehlsichtigen muß das Okular in der besprochenen Weise so eingestellt sein, daß das vom Fernrohr entworfene Bild im Unendlichen liegt. Damit auch Fehlsichtige ohne Brille das Fernrohr richtig benutzen können, wird das Okular in der Regel so verschoben, daß das Bild im Fernpunkt des betreffenden Beobachters entsteht. An solchen Okularen sind Teilungen für die Fernpunktabstände in dem für Brillen üblichen Maß der reziproken Brennweite in Metern, sogenannten Dioptrien angebracht.

39. Die Aufrichtung des Bildes eines astronomischen Fernrohrs kann durch ein Okular mit Zwischenabbildung erfolgen. Das terrestrische Okular nach Fraunhofer besteht aus vier plankonvexen Linsen, Abb. 10, nämlich dem Kollektiv α_1, der Umkehr-

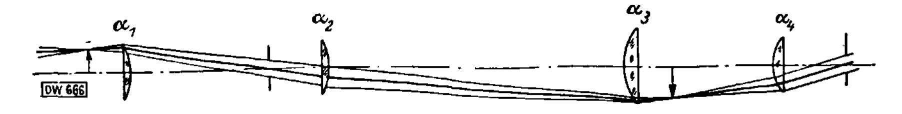


Abb. 10. Terrestrisches Okular

linse α_2 und einem aus Kollektiv α_3 und Augenlinse α_4 bestehenden Huygens'schen Okular. Durch α_2 wird das vom Objektiv bei α_1 erzeugte Bild bei α_3 umgekehrt abgebildet. Auf der Abbildung ist deutlich die bei der Länge des terrestrischen Okulars besonders wichtige Wirkung der Kollektive auf die Hauptstrahlen erkennbar. Bei kleinem Öffnungsverhältnis oder bei entsprechender Überkorrektion des zugehörigen Objektivs in bezug auf Farben und sphärische Abweichung sind die entstehenden Bilder sehr gut. Bei größerem Öffnungsverhältnis wird die Umkehrlinse aus mehreren Linsen zusammengesetzt, die ganz oder zum Teil verkittet sind und das Huygens'sche Okular durch ein leistungsfähigeres ersetzt (vgl. Abb. 14). Bei Anwendung größerer Öffnungsverhältnisse wird das terrestrische Okular erheblich verkürzt.

40. Ein Umkehrsystem, dessen Brennweite mindestens viermal kleiner (vgl. Ziff. 12) als der Abstand der ersten von der zweiten Bildebene ist, kann in zwei Lagen gebracht werden. In der ersten liegt es nahe bei dem vom Objektiv erzeugten Bild und entwirft von diesem ein nach Gl. (14) vergrößertes Bild in der Bildebene des Okulars. In der zweiten befindet es sich nahe der Bildebene des Okulars, in der es ein verkleinertes Bild entwirft. Man erhält so ein Okular mit Vergrößerungswechsel.

Besteht das Umkehrsystem aus zwei getrennten Linsen, kann durch Verschieben der Kombination bei gleichzeitiger Veränderung des Ab-

standes der beiden Teile eine stetige Veränderung der Vergrößerung erzielt werden. Dabei bewirkt das Verschieben der Kombination im ganzen die Veränderung der Vergrößerung, die Änderung des Abstandes der Teile die Scharfeinstellung des Bildes in der Brennebene des Okulars. Fernrohre mit derart stetig veränderlicher Vergrößerung heißen pankratisch. Die Hebung der Bildfehler ist nicht für alle Vergrößerungen die gleiche, sie kann aber ausgeglichen werden. Der wesentliche Vorteil solcher Anordnungen liegt darin, daß man wahlweise bei schwachen Vergrößerungen große dingseitige Gesichtsfelder und große Austrittspupille hat, bei starker Vergrößerung aber entsprechend mehr Einzelheiten erkennen bzw. die Richtgenauigkeit verbessern kann.

Ausführungsbeispiele

A. Himmelsfernrohre

41. Die Himmelsfernrohre dienen zur Beobachtung, Ortsbestimmung und Photographie von Gestirnen. Um die Helligkeit der Bilder und das Auflösungsvermögen (vgl. Ziff. 17 u. 36) zu steigern, muß der Objektivdurchmesser möglichst groß sein. Da aber zur Erhaltung einer befriedigenden Bildgüte das Öffnungsverhältnis nicht über etwa 1 : 15 bei Linsenfernrohren und 1 : 3 bei Spiegelfernrohren steigen soll, wird man zu verhältnismäßig langen Brennweiten geführt.

Die Vorteile des Linsenfernrohrs sind höchste Bildschärfe auch bei größeren Gesichtsfeldern und Unempfindlichkeit gegenüber ungleichmäßiger Erwärmung des Objektivs. Es wird daher vor allem zum Messen und zum Suchen verwendet. Die Vorteile des Spiegelfernrohrs sind Freiheit von Farbfehlern und Ausführbarkeit erheblich größerer Öffnungen wegen der geringeren Ansprüche an das Glas. Es ist also besonders geeignet für Beobachtung, Photographie und Spektroskopie lichtschwächster Gegenstände, z. B. Nebel. Das größte bisher ausgeführte Linsenfernrohr hat eine Öffnung von 1020 mm bei einem Öffnungsverhältnis 1 : 19,4, das größte Spiegelfernrohr eine Öffnung von 2580 mm bei einem Öffnungsverhältnis 1 : 5.

Die Aufstellung der größeren Himmelsfernrohre ist parallaktisch, d. h. die Fernrohre sind um zwei Achsen drehbar: die Polar- oder Stundenachse, die zum Himmelspol zeigt und die senkrecht dazu angeordnete Deklinationsachse. Durch Nachdrehen der Fernrohre um die Stundenachse allein, z. B. mittels eines Uhrwerkes, kann der Einfluß der Erddrehung aufgehoben werden, das Fernrohr bleibt dann immer auf denselben Teil des Himmels gerichtet.

42. Den Strahlengang eines Linsenfernrohrs zeigt Abb. 7. Abb. 11 ist die Ansicht eines kleinen Refraktors, Abb. 12 sind Skizzen der Strahlengänge der gebräuchlichsten Spiegelfernrohre. Der Fangspiegel

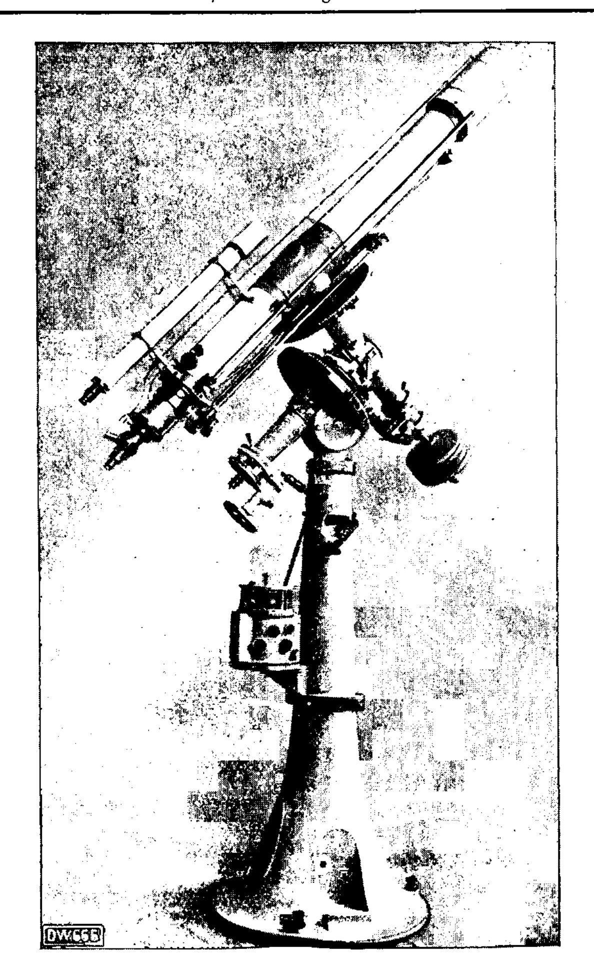


Abb. 11. 130 mm-Refraktor mit Sucherfernrohr in parallaktischer Aufstellung mit Uhrwerksantrieb in der Stundenachse

ist bei der Ausführung nach *Newton* eben, bei *Cassegrain* und *Nasmyth* erhaben (vgl. Ziff. 35). Die Verbindung von Haupt- und Fangspiegel wirkt also beim Fernrohr nach *Cassegrain* und *Nasmyth* wie ein Teleobjektiv (Ziff. 34), d. h. sie ermöglicht bei gleicher Brennweite eine kürzere Bauart als beim Fernrohr nach *Newton.*

Der Bildort bleibt unabhängig von der Richtung des Fernrohrs, wenn der austretende Strahl in die hohl ausgebildete Polarachse reflektiert

und der Fangspiegel bei Drehungen um die Deklinationsachse mit der halben Geschwindigkeit (Ziff. 5) mitgedreht wird. Eine derartige Anordnung heißt P o l a r h e l i o s t a t. Sie ist besonders wichtig bei der Anwendung umfangreicher und schwer beweglicher Hilfsgeräte, wie z. B. Spektrographen.

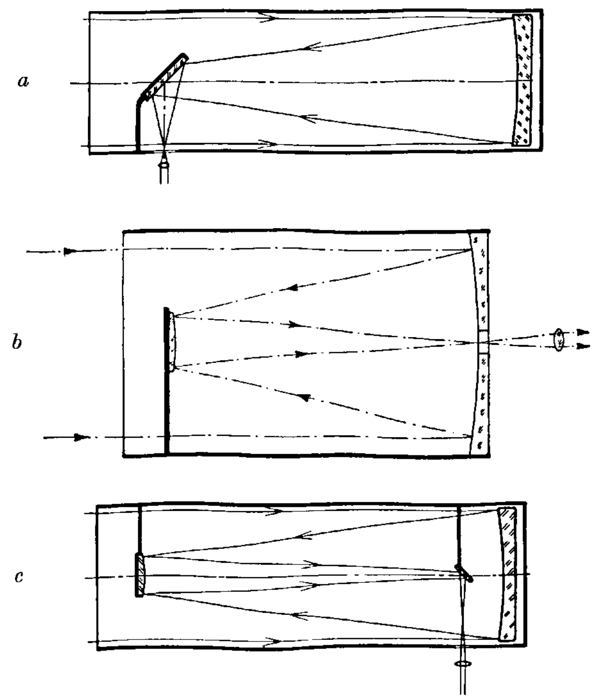


Abb. 12a, b, c. Spiegelfernrohre nach *Newton*, *Cassegrain* und *Nasmyth*

B. Erdfernrohre

43. Die Erdfernrohre dienen zum Beobachten, Anzielen und Vermessen irdischer Gegenstände. Die an sie gestellten Anforderungen sind vielseitig und wechselnd, es lassen sich aber gewisse allgemeine Gesichtspunkte angeben. Im Gegensatz zu den Himmelsfernrohren sollen die Erdfernrohre mit wenigen Ausnahmen aufrechte Bilder liefern. Wo Handlichkeit und gedrängte Bauart nötig sind, kann die Bildaufrichtung nur durch mehrere Spiegel erfolgen. Wo Betrachtung lichtschwacher ausgedehnter Gegenstände in Dämmerung und Nacht in Frage kommt, muß sich der Durchmesser der Austrittspupille mög-

lichst dem Durchmesser der Pupille des dunkeladaptierten Auges anpassen. Immer ist ein großes Gesichtsfeld erwünscht. Die günstigste Vergrößerung hängt von der gestellten Sonderaufgabe ab, sie geht auf Kosten des Gesichtsfeldes (Ziff. 30). Zu berücksichtigen ist, daß auch die Refraktionsstörungen der Luft und die Unruhe der Aufstellung mit vergrößert werden. Andererseits wächst bei kleineren Gegenständen die Erkennbarkeit im Dunkeln nicht nur mit der Austrittspupille, sondern auch mit der Vergrößerung (Ziff. 17). Bei Beobachtung mit Gasmaske oder Schutzbrille muß der Abstand des Auges von der letzten Fläche des Okulars etwa 20 mm betragen.

Immer ist die binokulare Beobachtung der monokularen vorzuziehen. Sie unterstützt die Beobachtung durch die eindeutige Tiefenwahrnehmung bei stereoskopischem Sehen, vermittelt bei gleichen Reizen stärkere Helligkeitsempfindungen und ist bei längerer Dauer weniger ermüdend. Besondere Vorteile hat die binokulare Ausführung bei den Einstandentfernungsmessern (Ziff. 54).

a) Beobachtungsfernrohre

44. Beim Prismenfeldstecher wird das Bild eines astronomischen Fernrohrs durch vier Reflexionen an zwei 90°-Winkelspiegeln (Ziff. 8) aufgerichtet, deren Kanten zueinander senkrecht stehen. Bei der üblichen, in Abb. 13 wiedergegebenen Form wird dadurch eine erhebliche Verkürzung der Fernrohrlänge, beim Doppelfernrohr eine Vergrößerung des Abstandes der Objektive voneinander und damit eine erhöhte Plastik der Bilder erreicht.

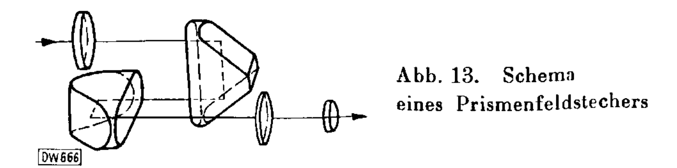


Abb. 13. Schema eines Prismenfeldstechers

45. Beim Scherenfernrohr werden die Bilder ebenfalls durch vier Reflexionen aufgerichtet. Aber hier bewirkt der große Abstand einer der reflektierenden Flächen von den übrigen eine große Parallelversetzung der Achsen des eintretenden und des austretenden Bündels. Man benutzt diese Versetzung entweder zur Erzielung einer besonders großen Plastik bei auseinandergeklappten Armen oder vollständiger Deckungsmöglichkeit bei zusammengeklappten Armen.

Nach dem in Ziff. 5 über Winkelspiegel Gesagten bleiben die Bilder sowohl beim Prismen- wie beim Scherenfernrohr aufrecht, wenn man die Geräte um beliebige Achsen schwenkt.

b) Zielfernrohre

46. Zielfernrohre haben gegenüber den einfachen Dioptern, wie Kimme und Korn, den Vorzug, daß Marke und Ziel gleichzeitig scharf erscheinen. Dadurch wird die Zielgenauigkeit erhöht; sie wird noch weiter gesteigert bei Anwendung einer Vergrößerung. Man kann die Bilder bei Zielfernrohren durch Linsensysteme in Art der terrestrischen Okulare aufrichten. Diese lange Bauweise gewährt besondere Sicherheit in der Erhaltung der Visierlinie, weil durch sie ein größerer Lagerabstand möglich wird. Man legt die Strichmarke (das „Abkommen") in die erste Bildebene; so bleibt die Visierlinie von seitlichen Bewegungen der folgenden optischen Teile unabhängig, und bei Vergrößerungswechsel wird auch die scheinbare Größe des Abkommens geändert.

47. Abb. 14 zeigt den Schnitt eines Zielfernrohrs für Gewehre. Um dem Schützen Überblick und Schutz vor Verletzungen zu geben, beträgt der Abstand des Auges von der Augenlinse etwa

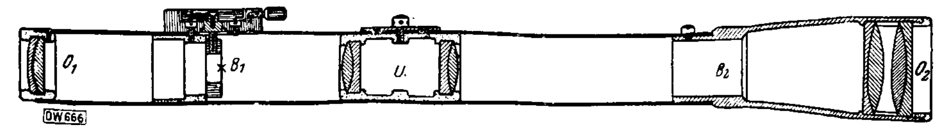


Abb. 14. Schnitt durch ein Gewehrzielfernrohr
O_1 Objektiv, O_2 Okular, U Umkehrsystem, B_1 und B_2 erste und zweite Bildebene

80 mm; diese hat zur Erhaltung eines hinreichend großen Gesichtsfeldes (etwa 25°) besonders großen Durchmesser. Bei einigen Ausführungen kann die Vergrößerung durch Verschieben des Okularsystems (Ziff. 40) geändert werden. Beträgt die Vergrößerung 1, geht bei schmaler Okularfassung das Fernrohrbild fast ohne Abgrenzung in das direkte Bild über.

48. Abb. 15 ist ein pankratisches Schartenzielfernrohr zum direkten Richten für Schiffsgeschütze, das zur Anpassung an die stark wechselnden Zielverhältnisse mit stetigem Vergrößerungswechsel zwischen 4- und 20fach ausgestattet ist. Entsprechend ändert sich die Austrittspupille zwischen 11 und 2,2 mm, das dingseitige Gesichtsfeld zwischen 12,5° und 2,5° (vgl. Ziff. 40).

49. Bei Landgeschützen wird fast nur indirekt gerichtet: das Ziel ist unsichtbar und zum Richten wird ein Hilfsziel benutzt, dessen Richtung mit der des Zieles bzw. des Rohres einen festen, aber beliebigen Winkel bildet. Um bei fest montiertem Gerät und unveränderter Kopfhaltung beliebige Gegenstände ins Gesichtsfeld zu bekommen, wird das Rundblickfernrohr benutzt; es ist in Abb. 16 dargestellt. Das Schwenken

der Visierlinie geschieht durch Drehung eines 90°-Prismas. Um das Stürzen der Bilder aufzuheben, wird ein gradsichtiges Wendeprisma mit der halben Geschwindigkeit des Objektivprismas mitgedreht (vgl. Ziff. 5). Da das Wendeprisma nur im parallelen Strahlengang keine Bildfehler gibt, wird das Objektiv erst dahinter angebracht. Die zweite Ablenkung der Strahlen in die waagerechte Beobachtungsrichtung und die Bildaufrichtung erfolgt durch ein 90°-Dachprisma; die Zahl der Reflexionen wird damit wieder gerade.

50. Eine besondere Art von Zielfernrohren sind die Nivelliere und Theodolite für geodätische Zwecke. Bei ihnen verzichtet man zu Gunsten der Unempfindlichkeit der Visierlinie und der Klarheit der Bilder auf Bildaufrichtung. Zum bequemen Transport, und um die Fernrohre in zwei um 180° verschiedenen Orientierungen zu den Teilkreisen benutzen zu können, müssen sie kurz sein. Andererseits verlangt hohe Richtgenauigkeit starke Vergrößerung, also bei den üblichen Okularbrennweiten lange Objektivbrennweiten. Man wendet daher Teleobjektive an (Ziff. 34). Um bei der Vermessung Ziele sehr verschiedener und oft sehr geringer Entfernung in die Ebene der Strichmarke abzubilden, wird die Negativlinse in Richtung der Fernrohrachse genau parallel zu ihr verschoben.

c) Sehrohre

51. Die Sehrohre sollen das Auge an einem Ort abbilden, der für das Auge selbst unzugänglich ist. Sie sollen bei vorgegebener Länge und Querschnitt bei einer Vergrößerung, die mindestens 1,5 beträgt, möglichst große Helligkeit und großes Gesichtsfeld erreichen. Dies gelingt durch eine besondere Ausführung des terrestrischen Okulars (Ziff. 39), das fast über die

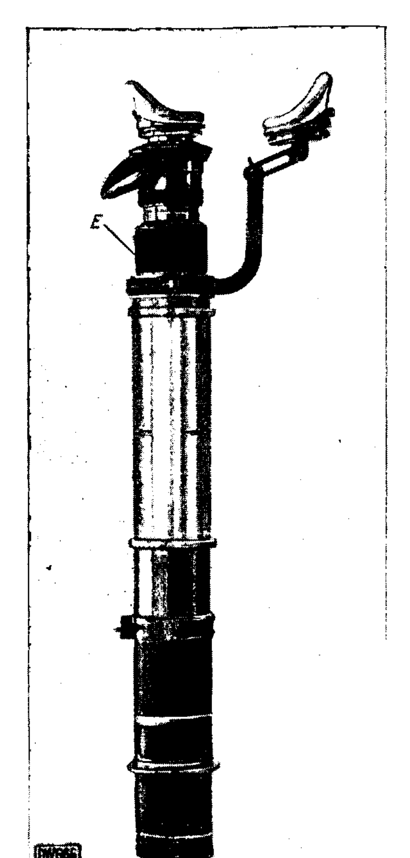


Abb. 15. Pankratisches Schartenzielfernrohr
E Einstellung der Vergrößerung

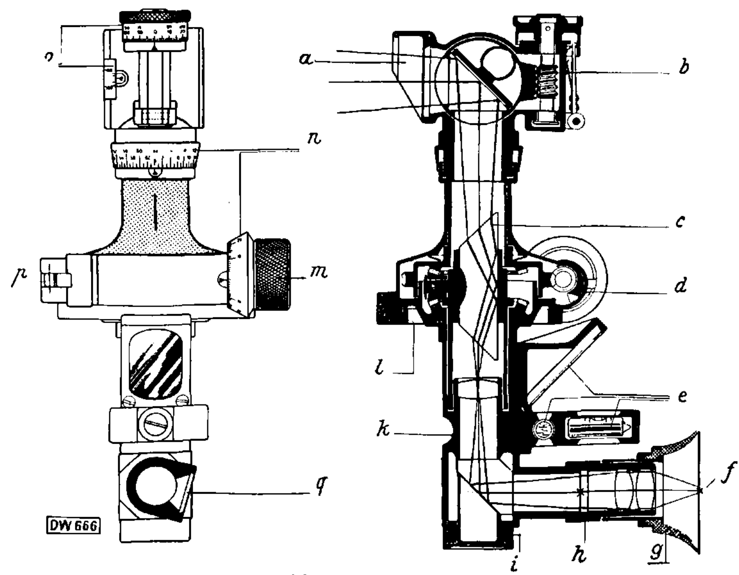
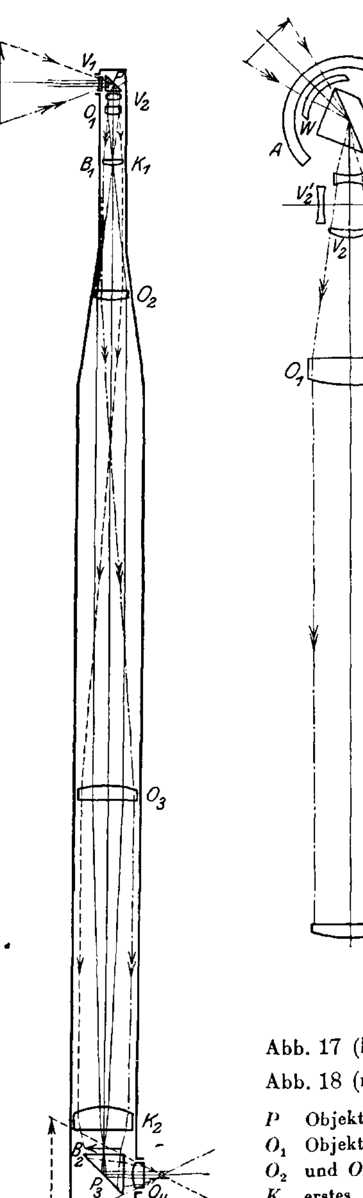


Abb. 16. Rundblickfernrohr

a Ausblick
b Höhenwinkel-Meßschnecke
c bildaufrichtendes Prisma
d Exzenter zum Auslösen der Meßschnecke
e Spiegel-Kreuzlibellen
f Einblick
g abnehmbare Augenmuschel
h Strichplatte
i unterer Aufnahmezylinder
k Verriegelungsnut
l oberer Aufnahmezylinder
m Seitenwinkel-Meßschnecke
n Seitenwinkel-Teilung
o Höhenwinkel-Teilung
p Auslösung der Meßschnecke
q Nachtbeleuchtungsfenster zur Strichplatte

ganze Rohrlänge geht. Abb. 17 ist das Schema eines einfachen U-Boot-Sehrohres, Abb. 18 das Schema eines Sehrohres für Luftzielbeobachtung und Navigation.

Beim Luftzielsehrohr treten die Strahlen durch das von zwei konzentrischen Kugelschalen begrenzte Verschlußglas *A* in das Sehrohr ein. Dieses Verschlußglas wirkt als Negativlinse, deren Wirkung durch die Positivlinse *W* aufgehoben wird: sie wird mit der Schwenkgeschwindigkeit des eintretenden Bündels, also der doppelten des Prismas *P* mitgedreht. *P* besteht aus zwei in gleicher Weise wirkenden Hälften, so daß bei jedem Schwenkwinkel die volle Öffnung benutzt wird. O_1 ist das Objektiv; die folgenden Linsen bilden wieder ein terrestrisches Okular (wie bei Abb. 17), dessen Umkehrlinsen sehr großen Abstand voneinander haben. Durch wahlweises Vorschalten der holländischen Fernrohre V1, V2 und V1′, V2′ (Ziff. 21), einmal Negativlinse und einmal Positivlinse voran, also einmal mit verkleinernder, einmal mit vergrößernder Wirkung, erhält man die Vergrößerungen 1,5 und 6fach.



C. Entfernungsmesser

52. Die optische Entfernungsmessung beruht auf der Winkelmessung in einem Dreieck, von dem eine Seite bekannt ist. So können nacheinander von zwei Ecken des Dreiecks die Winkel gemessen werden, unter denen die gegenüberliegenden Seiten erscheinen. Zur Berechnung ihrer Länge dienen die bekannten trigonometrischen Beziehungen. Derartige Verfahren sind vor allem in der Geodäsie üblich; dort werden auf Teilkreise aufgesetzte Richtfernrohre der in Ziff. 50 beschriebenen Art benutzt. Bei den Zweistandentfernungsmessern wird die Messung von zwei Ecken des Dreiecks aus gleichzeitig durch zwei Theodolite vorgenommen und die Einstellung des Nebenstandes sofort dem Hauptstand mitgeteilt; dort gehen die Einstellungen beider Theodolite in eine Rechenmaschine zur sofortigen Ermittlung der Entfernung des Zieles vom Hauptstand ein. Derartige Entfernungsmesser werden bei der Küstenverteidigung verwendet.

Abb. 17 (links). Schema eines Unterseeboots-Sehrohres

Abb. 18 (rechts). Oberer Teil eines Luftzielsehrohres

P Objektivprisma
O_1 Objektiv
O_2 und O_3 Umkehrlinsen
K_1 erstes, K_2 zweites Kollektiv
P_3 Okularprisma
O_4 Augenlinse des Okulars
B_1 erste, B_2 zweite Bildebene

Die geometrischen Verhältnisse, und damit die Messungen werden einfacher, wenn im Meßdreieck eine Seite, die Basis, sehr klein gegen die beiden anderen wird. Es sei, Abb. 19, $AB = e$ die zu messende Entfernung, $BC = b$ die Basis und $b \ll e$, dann ist $AB \sim AC = e$ und die Parallaxe δ wird

$$\delta = \frac{b}{e} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (27).$$

53. Die Basis kann beim Ziel oder beim Beobachter liegen. Im ersten Fall muß die lineare Ausdehnung b des Zieles bekannt sein; man mißt dann mit einem Fernrohr den Winkel δ, unter dem es erscheint und berechnet die Entfernung e nach Gl. (27). Fernrohre mit einer Vorrichtung zum Messen von δ und oft auch zur Berechnung von e heißen Zielwinkelentfernungsmesser. Sie werden in der Geodäsie als Tachymeter ausgebildet, bei denen das Ziel durch eine Latte mit bekannter Teilung dargestellt wird. Man benutzt Zielwinkelentfernungsmesser auch für militärische Zwecke, wenn bei geringen Genauigkeitsansprüchen die Größe des Zieles als bekannt gelten kann, z. B. die Höhe feindlicher Schiffe bei Beobachtung durch ein U-Boot-Sehrohr.

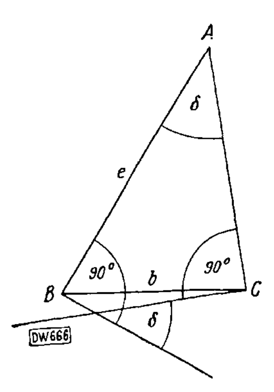
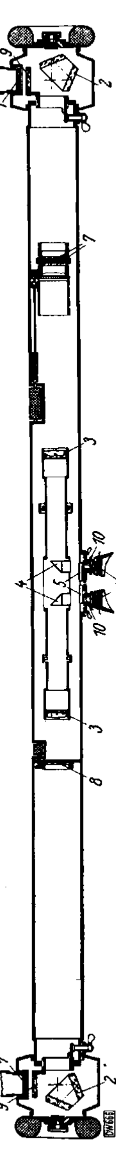


Abb. 19. Das Meßdreieck

Im zweiten Fall, dem Einstandentfernungsmesser, werden die vom Ziel A kommenden Strahlen AB und AC an den Enden eines die Basis b darstellenden starren Trägers um genau 90° abgelenkt. Man bedient sich dabei der Winkelspiegel (Ziff. 5, Abb. 2). Aus Abb. 19 ist ersichtlich, daß die Parallaxe δ wiederkehrt als der spitze Winkel zwischen den beiden um 90° abgelenkten Strahlen. Vereinigt man die beiden Strahlen bzw. die entsprechenden in den Brennebenen zweier Objektive entworfenen Zielbilder in einem monokularen oder binokularen Gesichtsfeld, so kann ihr Richtungsunterschied, eben die Parallaxe δ, durch ein bzw. zwei Okulare beobachtet werden. Die Messung von δ erfolgt entweder durch Vergleich mit einer festen, in der Bildebene befindlichen Winkelskala oder dadurch, daß man mittels einer Vorrichtung in Art des in Ziff. 8 beschriebenen Doppelkeils, eines sogenannten Kompensators, $\delta = 0$ macht. Am Kompensator ist unmittelbar die Entfernung e abzulesen, die nach Gl. (27) bzw. (4) der gemessenen Parallaxe δ bzw. der Stellung des Kompensators entspricht. Die Genauigkeit der Messung wird dadurch wesentlich erhöht, daß die beiden Zielbilder, und damit auch ihre Parallaxe, durch die Fernrohre vergrößert sind.

Der theoretische Meßfehler einer derartigen Anordnung ergibt sich durch Differentiation der Gl. (27) unter Berücksichtigung der Fernrohrvergrößerung Γ zu



$$|d\,e| = \frac{e^2}{b \cdot \Gamma \cdot 20\,600} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (28),$$

wo $\frac{1}{20\,600} \sim 10''$ ungefähr das Winkelauflösungsvermögen des Auges ist. Die Meßgenauigkeit nimmt also proportional dem Produkt von Basis und Vergrößerung zu und mit dem Quadrat der Entfernung ab. Z. B. beträgt der theoretische Fehler eines Entfernungsmessers von 6 m Basis und 25facher Vergrößerung bei 2000 m : 1,3 m, bei 20 000 m : 130 m.

Der Einstandentfernungsmesser löst die Aufgabe, die Entfernung beweglicher oder wechselnder Ziele schnell, genau und unabhängig von Bewegungen der Basis zu messen.

54. Abb. 20 ist ein Längsschnitt durch einen stereoskopischen Entfernungsmesser von 2 m Basis und 19facher Vergrößerung. Die vom Ziel kommenden Strahlen treten durch die Verschlußgläser 1 in das Instrument ein, werden durch die Winkelspiegel 2 um 90° abgelenkt und durch die Objektive 3 und die Prismen 4 in den Bildebenen 5 vereinigt. Die Objektive sind in einem gemeinsamen Rohr, dem Innenrohr, eingebaut, um Verfälschungen von δ durch Verschieben der Objektive und Durchbiegen des Außenrohres zu vermeiden. In der Bildebene befinden sich Marken, die durch die Okulare 6 gemeinsam mit dem Ziel stereoskopisch gesehen werden. Ihr gegenseitiger Abstand ist so eingestellt, daß sie bei richtig justiertem Entfernungsmesser in gleicher Tiefe erscheinen wie ein unendlich fernes Ziel, für das nach Gl. (27) $\delta = 0$ ist. 7 ist der aus zwei Keilen nach Ziff. 8 bestehende Kompensator mit der die Entfernungsteilung tragenden Trommel; Kompensator und Meßtrommel werden gemeinsam durch eine Walze ge-

Abb. 20. **Schnitt durch einen stereoskopischen Entfernungsmesser**

1	**Verschlußgläser**	6	**Okulare**
2	**Winkelspiegel**	7	**Kompensator**
3	**Objektive**	8	**Meßtrommel**
4	**Prismen**	9	**Linsen**
5	**Bildebenen**	10	**rhombische Prismen**

dreht. Die Anpassung des Okularabstandes an den Augenabstand der Beobachter geschieht durch Schwenken der Okulare um die rhombischen Prismen 10 (vgl. Ziff. 5 und Abb. 2).

Die Linsen 9 werden nur zur Kontrolle und Justierung des Entfernungsmessers vorgeschlagen; sie bilden zwei vertikale Striche von Basisabstand, die von einer parallel zur Basis ausgerichteten Latte getragen werden, im Unendlichen ab. Nach Einstellung des Kompensators auf verschwindenden Tiefenunterschied zwischen den Marken des Entfernungsmessers und den Lattenstrichen muß die Entfernungsteilung auf „Unendlich“ stehen. Da aber die optischen Elemente und die Luft im Innern des Gerätes Ablenkungen der Strahlen bewirken und so die Parallaxe δ verfälschen können, muß zur Justierung des

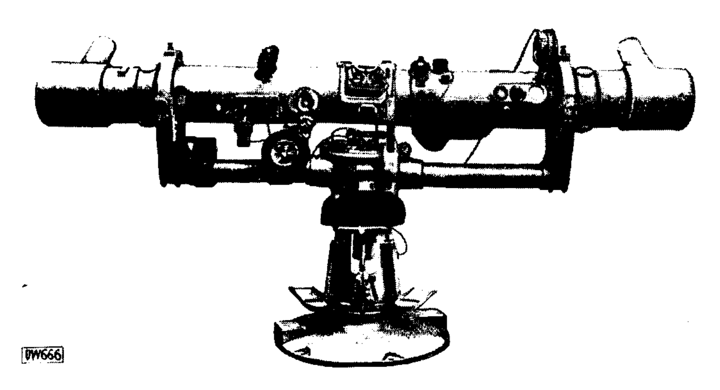


Abb. 21. Stereoskopischer Marine-Entfernungsmesser von 3 m Basis

Entfernungsmessers bei Einstellung der Entfernungsteilung auf „Unendlich“ der Berichtigungskeil 8 solange gedreht werden, bis ein Tiefenunterschied zwischen Marken- und Lattenstrichen nicht mehr erkennbar ist. In dieser Stellung ist die durch den Berichtigungskeil in der Ebene des Meßdreiecks bewirkte Ablenkung gleich der Summe aller Ablenkungsfehler in dieser Ebene mit umgekehrtem Vorzeichen. Ablenkungsfehler senkrecht zu dieser Ebene, sogenannte Höhenfehler, geben an sich keine Meßfehler; sie können aber den räumlichen Eindruck und damit die Messung beeinträchtigen, weil die Zielbilder von den Marken in beiden Gesichtsfeldern der Höhe nach verschiedene Abstände haben. Zur Abstellung eines Höhenfehlers wird das kardanisch gelagerte Innenrohr um entsprechende Beträge um eine senkrecht zur Basis liegende Achse geschwenkt.

Abb. 21 ist die Ansicht eines stereoskopischen Marine-Entfernungsmessers von 3 m Basis. An Stelle der Justierung nach Latte tritt hier

die sogen. absolute Innenjustierung; sie wirkt grundsätzlich wie die Lattenjustierung. Ihre sämtlichen Bestandteile sind jedoch im Entfernungsmesser enthalten und werden so verwendet, daß die Fehler der Berichtigungseinrichtung sich durch den Justiervorgang selbst aufheben.

Schrifttum

Czapski-Eppenstein: Grundzüge der Theorie der optischen Instrumente. 3. Aufl. Leipzig 1924.

Witthaker: Einführung in die Theorie der optischen Instrumente. Leipzig 1926.

A. König: Die Fernrohre und Entfernungsmesser. 2. Aufl. Berlin 1937. Julius Springer.

Ders.: Geometrische Optik in: Handbuch der Experimentalphysik, Bd. 20. Leipzig 1929. Akademische Verlagsgesellschaft.

Ders.: Das Fernrohr in: Handbuch der Astrophysik, Bd. 1. Berlin 1933. Julius Springer.

O. Eppenstein: Das Fernrohr in: Handbuch der Physik, Bd. 8. Berlin 1927. Julius Springer.

Die Abb. 7 bis 10, 12 sind aus König: Das Fernrohr; Abb. 14, 17, 18 aus Eppenstein: Das Fernrohr entnommen

Die Entwicklung der Telegraphie auf Drahtleitungen

Von *E. Feyerabend VDE*, Berlin *)

Vorbemerkung

Für den in diesem Heft gegebenen Rückblick über die Entwicklung der Telegraphentechnik war es bei der Reichhaltigkeit des Stoffes und wegen der Knappheit des Raumes nicht zu vermeiden, Beschränkung auf das Grundsätzliche und auf einen bestimmten Zeitabschnitt der Entwicklung zu üben. Als Ausgangspunkt ist daher das Erscheinen des Morseapparats in Deutschland um das Jahr 1848 und als Abschluß im allgemeinen der Zeitpunkt gewählt worden, wo die drahtlose Technik den Werdegang der Telegraphie zu beeinflussen begann. Da die ersten Anfänge der Telegraphie bereits im Heft 5 (1933) „An der Wiege des elektrischen Telegraphen" von mir und „Die Entwicklung der Funkentelegraphie" im Heft 6 (1936) von *J. Zenneck* behandelt worden sind, erscheint die angegebene Beschränkung ohne Bedenken.

Die wichtigste Aufgabe jeder Art von Fernverständigung war von jeher, Raum und Zeit möglichst restlos zu überwinden. Mit dem schnell zunehmenden Bedürfnis für immer höhere Verkehrsleistungen traten indessen als weitere Aufgaben größtmögliche Zuverlässigkeit der Übertragung und wirtschaftliche Ausnutzung der technischen Mittel hinzu. Beim Erstreben dieser Ziele hat die elektrische Telegraphie von vornherein verschiedene Wege eingeschlagen, so daß es bei flüchtiger Betrachtung den Anschein hat, als ob die zahlreichen, oft zeitlich nebeneinander einhergehenden Neuschöpfungen und Verbesserungen ohne ursächlichen Zusammenhang zustande gekommen seien. Das trifft jedoch nicht zu; weder dem Zufall noch einer Erfinderlaune, auch nicht dem reinen Probieren verdanken sie ihr Entstehen, sondern klar durchdachter Gedankenarbeit, wobei die wissenschaftliche Durchdringung der Probleme eine immer größere Rolle gespielt hat. So ist aus dem ungefügen Bastlererzeugnis noch ungeschulter Köpfe, als das uns Menschen von heute der erste Apparat von *Morse* erscheint, im Verlaufe von noch nicht hundert Jahren in folgerichtiger Entwicklung eine

*) Staatssekretär i. R. Dr.-Ing. E. h. *Feyerabend* schrieb auch das Heft: „An der Wiege des elektrischen Telegraphen" 5. Jg. (1933) H. 5 dieser Schriftenreihe und „Der Telegraph von Gauß und Weber im Werden der elektrischen Telegraphie". Herausgegeben vom Reichspostministerium, Berlin 1933.

weitverzweigte Technik entstanden, die durch die Kunst ihrer mechanischen Mittel und die geistreiche Nutzbarmachung zahlreicher inzwischen gewonnener wissenschaftlicher Erkenntnisse unsere uneingeschränkte Bewunderung erregen muß.

Die Nadel-, Zeiger- und elektrochemischen Telegraphen

Erst anfangs der vierziger Jahre des vorigen Jahrhunderts war der elektrische Telegraph technisch soweit entwickelt, daß seine Verwendung für den Nachrichtenverkehr praktisch möglich war. In verschiedenen Ausführungsformen standen damals zur Verfügung:

a) Nadeltelegraphen (*Cooke, Wheatstone, Bain* u. a.)
b) Zeigertelegraphen (*Cooke, Wheatstone, Fardely, Bréguet, Leonhardt, Stöhrer, Siemens, Kramer*)
c) elektrochemische Telegraphen (*Davy, Bain*).

Bei den Nadeltelegraphen wird von der Ablenkung einer oder mehrerer Magnetnadeln durch den Telegraphierstrom, und zwar je nach der Stromrichtung im einen oder im entgegengesetzten Sinne, Gebrauch gemacht. Die Zeichen werden, soweit nötig, aus Kombinationen mehrerer solcher Ablenkungen gebildet. Das Deuten der ankommenden Zeichen, die der Apparat selbst nicht aufzeichnet, ist nur Geübten möglich.

Bei den Zeigertelegraphen wird durch die elektromagnetische Wirkung der Telegraphierströme ein Zeiger über einem feststehenden Zifferblatt, an dessen Rand die Buchstaben und sonstigen Zeichen in gleichen Abständen aufgezeichnet sind, schrittweise gedreht, bis er vor dem zu übermittelnden Zeichen angelangt ist. Dort bleibt er einen Augenblick stehen und kehrt dann in die Ruhelage zurück. Die Zeichen sind wie bei den Nadeltelegraphen vergänglich, können aber von jedermann gelesen werden. Zwischen Geber und Empfänger muß für jede Zeichengebung Gleichlauf bestehen. Bei den leicht eintretenden Störungen des Gleichlaufs entstehen Falschübertragungen.

Für die elektrochemischen Telegraphen wird die elektrolytische Zerlegung zusammengesetzter farbloser Salzlösungen durch den Telegraphierstrom zur Zeichenbildung benutzt. Man wählt solche Salze aus, deren einer Bestandteil sich unter der Wirkung des Stromes färbt. Läßt man einen mit der Salzlösung getränkten Papierstreifen durch ein Uhrwerk über eine geerdete Metallwalze hinwegziehen und an der Stelle, wo der Streifen die Walze berührt, einen mit der Telegraphenleitung verbundenen Metallstift auf dem Papierstreifen schleifen, so zersetzen die ankommenden, aus Kombinationen von Strömen kürzerer oder längerer Dauer bestehenden Telegraphierströme die Salzlösung im Papierstreifen an der Berührungsstelle zwischen

Stift und Papier und erzeugen kürzere oder längere farbige Striche. Die Zeichen werden also aufgezeichnet, können aber nur von Geübten gelesen werden. Wegen häufig vorkommender Undeutlichkeit der Zeichen war ihre elektrochemische Übertragung nicht genügend zuverlässig.

Als letztes Ziel wurde schon in jener frühen Zeit das Drucken der Zeichen durch den Telegraphen in für jedermann lesbarer Schrift erkannt und erstrebt. Es sind auch bald Lösungen gefunden worden, die Apparate für Druckschrift waren aber mechanisch unvollkommen und arbeiteten zu langsam.

Die Nutznießer des elektrischen Telegraphen

Als Nutznießer für den elektrischen Telegraphen kamen zu Anfang der 40er Jahre des vorigen Jahrhunderts hauptsächlich die um jene Zeit sich ausbreitenden Eisenbahnen in Betracht. Für sie war der Telegraph indessen nur ein Hilfswerkzeug ihrer Verkehrsaufgaben und mußte als solches sich den Bedürfnissen des Eisenbahnbetriebes anpassen. Dazu gehörte, daß der Telegraph auch von den ungeübten Personen des Streckendienstes gehandhabt werden konnte, daß die Einrichtungen möglichst einfach und betriebssicher waren und sich in den Anlage- und Betriebskosten nicht zu teuer stellten; es genügte auch, wenn sich Entfernungen bis etwa 60 km erreichen ließen. Diesen Forderungen entsprachen die Nadel- und Zeigertelegraphen trotz ihrer Unvollkommenheiten in ausreichendem Maße. Fast alle Eisenbahnen haben sich daher ihrer bedient und sind ihnen bis gegen Ende des Jahrhunderts, als leistungsfähigere Einrichtungen längst zu Gebote standen, treu geblieben.

Erst ein Jahrzehnt später als die Eisenbahnen gewannen die Staatsverwaltungen, soweit sie die Betreuer des großen öffentlichen Nachrichtenverkehrs waren, lebhaftes Interesse an der elektrischen Telegraphie. Es will uns heute kaum verständlich erscheinen, daß z. B. in Preußen erst die politischen Schwierigkeiten des Jahres 1848 die bürokratischen Vorurteile gegen die Einführung des elektrischen Telegraphen zu Fall brachten. Ganz frei gemacht wurde die Bahn aber erst, als die preußische Regierung Ende 1849 — als erste unter den Staatsgewalten des europäischen Festlandes — die Benutzung des Staatstelegraphen auch für den Privatverkehr des Publikums zuließ. Von da an nahm die Entwicklung der Telegraphie überall einen geradezu stürmischen Verlauf.

Bei der Telegraphie des großen Nachrichtenverkehrs liegen die Bedürfnisse anders als bei den Eisenbahnen. Hier ist ihre wesentliche Aufgabe, alle anfallenden Nachrichten zu jeder Zeit möglichst schnell und fehlerfrei dem Ort der Bestimmung zuzuführen; auf die Art der

technischen Hilfsmittel kommt es weniger an. Da das Bedienungspersonal andere als die Telegraphierarbeit nicht zu verrichten hat, kann es nach den Erfordernissen dieses Dienstes ausgesucht, besonders ausgebildet und dadurch befähigt werden, auch verwickelte Einrichtungen zu handhaben. Wir können daher beobachten, wie die Telegraphentechniker vor keiner Kompliziertheit zurückschrecken und wie anderseits die Betriebsleiter sich bemühen, dieser Schwierigkeiten Herr zu werden. Dabei spielt auch die Kostenfrage keine ausschlaggebende Rolle; denn der Staat, zu dessen Notwendigkeiten die Telegraphie gehört, muß im Bedarfsfalle Zuschüsse leisten. Natürlich bleibt es das Ziel auch für die Staatstelegraphie, ihre Aufgabe mit dem geringsten Aufwand an Mitteln zu erfüllen. Es ist daher festzustellen, daß bei allen Neuschöpfungen und Verbesserungen auch das Bestreben bestmöglicher Ausnutzung der technischen Mittel und der sie handhabenden Personen von vornherein zur Geltung gekommen ist.

Zunächst mußte sich allerdings auch die Staatstelegraphie noch der Nadel-, Zeiger- und chemischen Telegraphen bedienen. Als aber im Jahre 1848 in Deutschland mit dem in Amerika entstandenen Morseapparat ein wesentlich leistungsfähigeres Werkzeug angeboten wurde, haben die Staatsverwaltungen es schnell und in immer steigendem Umfang in ihren Dienst gestellt.

Die elektromagnetischen Schreibtelegraphen

Die elektromagnetischen Schreibtelegraphen sind dadurch gekennzeichnet, daß durch Telegraphierströme von kürzerer oder längerer Dauer entsprechende Bewegungen des Ankers eines Elektromagneten hervorgerufen und daß diese Bewegungen dazu benutzt werden, einen Schreibhebel zu betätigen, der auf einem gleichmäßig ablaufenden Papierstreifen Schriftzeichen in Gestalt kürzerer oder längerer Striche aufschreibt.

Der älteste Vertreter dieser Gruppe ist der Schreibapparat von Morse. Der Erfinder, *Samuel F. B. Morse* in New York, datiert dessen Enstehung bis zum Jahr 1832 zurück und beansprucht damit die Erfindung des elektrischen Telegraphen überhaupt. Das widerspricht den Tatsachen. Der Apparat von *Morse* hat die erste Probe seiner Verwendbarkeit erst im Jahre 1844 auf der Versuchsstrecke von Washington nach Baltimore abgelegt, als in Europa elektrische Telegraphen anderer Bauart schon längst im praktischen Betrieb standen. Unbestritten ist dagegen das Verdienst *Morses* und seiner nicht genannten Helfer, durch die Art, wie sie sich die Wirkung des Elektromagnetismus zunutze machten, ein Telegraphierverfahren geschaffen zu haben, das den bis dahin bestehenden überlegen war und sich durch seine Vorzüge im Laufe eines Vierteljahrhunderts die ganze Welt

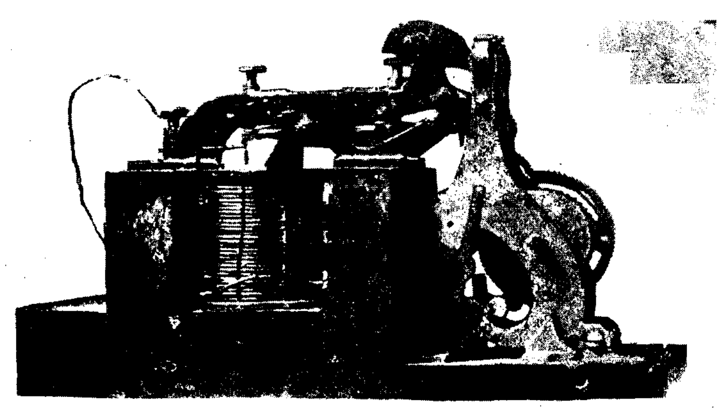
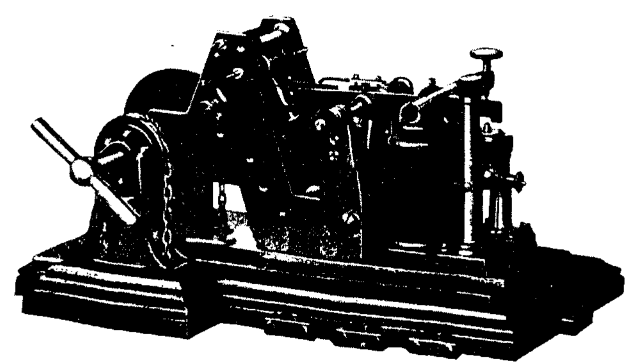
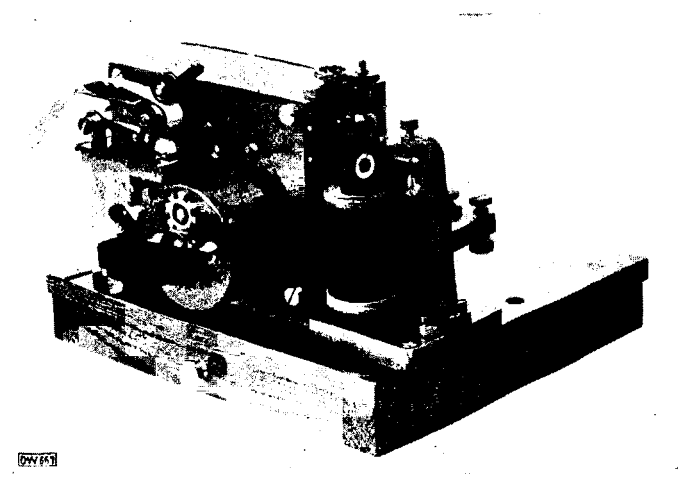


Abb. 1 (oben) Erster amerikanischer Morseschreiber für Reliefschrift, 1844

Abb. 2 (rechts). Morseschreiber für Reliefschrift von Siemens & Halske, 1852

Abb. 3 (unten) Normalfarbschreiber der deutschen Telegraphenverwaltung, 1870





erobert hat. Allerdings hat auch die ganze Welt an diesem Erfolg mitgearbeitet. Hauptsächlich in deutschen Werkstätten ist in mehr als zwanzigjähriger Entwicklungsarbeit aus dem plumpen und ungefügen ersten „Reliefschreiber“ von *Morse* der „Normalfarbschreiber“ von Siemens & Halske von 1870 entstanden, der ein mechanisches Kunstwerk ist und bei dem nur noch der senkrecht stehende Elektromagnet und der waagerecht gelagerte Schreibhebel an die erste Ausgangsform von *Morse* erinnern. Die wichtigste Vervollkommnung erfuhr der Apparat dadurch, daß der die Schriftzeichen in den Papierstreifen reliefartig eindrückende Schreibstift durch ein in einem Farbbehälter sich drehendes Scheibchen ersetzt wurde, das mit seiner sich immer neu einfärbenden Schneide im Rhythmus der ankommenden Schriftzeichen den ablaufenden Papierstreifen nur lose berührt. Dadurch kam nicht nur eine Schrift zustande, die viel klarer und leichter lesbar war, sondern der Arbeitsaufwand zu ihrer Erzeugung wurde auch wesentlich verringert. Der Apparat arbeitete daher mit schwächeren Strömen als der Reliefschreiber und sprach schneller an, beides Umstände, die die Telegraphiergeschwindigkeit erhöhten.

Auch die „Taste“, mit der die Zeichenströme in die Leitung gesandt wurden, wurde in Deutschland sogleich handlicher gestaltet, so daß sie mit geringerer Anstrengung schneller gehandhabt werden konnte.

Schließlich ist auch die von *Morse* angewandte Strich-Punkt-Schrift in Deutschland sogleich im Aufbau der Zeichen verbessert worden, wodurch sie leichter zu erlernen und genauer wiederzugeben war. Das ist die „Morseschrift“, die unter diesem ihr geschichtlich nicht zukommenden Namen ebenfalls Weltgeltung erlangt und sich bis heute bewahrt hat.

Durch diese Verbesserungen war die Leistungsfähigkeit des Morsetelegraphen soweit gesteigert worden, daß sich bis zu 60 Zeichen in der Minute übermitteln ließen, was für den kleinen Verkehr auch heute noch genügt, für den großen Verkehr sich dagegen bald als nicht mehr ausreichend erwies.

Die Erfahrung hatte gezeigt, daß es dem geübten Telegraphisten nicht schwer fällt, die Zeichen auch nach dem bei den Anschlägen des Elektromagnetankers entstehenden Klang zu erkennen, und daß er sie sogar schneller mit dem Ohr als mit dem Auge auf dem Papierstreifen aufnehmen kann. Will man auf die Niederschrift der Zeichen als Beleg verzichten, dann bedarf es für den Hörempfang nur des Elektromagneten mit dem zwischen Anschlägen spielenden Anker. So entstand der „Klopfer“, der überall Eingang gefunden und sich für Sonderzwecke bis heute gehalten hat, namentlich in der Form des „Summers“, bei dem die Morsezeichen dem Ohre durch einen Fern-

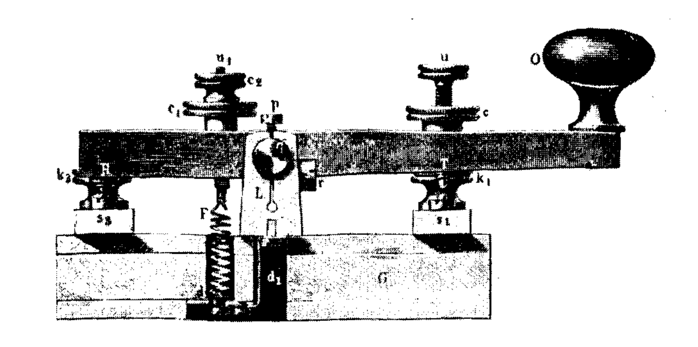
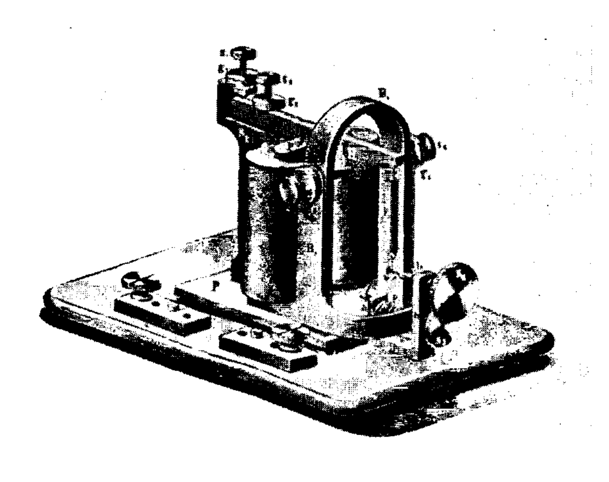


Abb. 4. Morsetaste der Reichstelegraphenverwaltung (Seitenansicht)



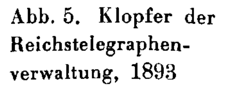


Abb. 5. Klopfer der Reichstelegraphenverwaltung, 1893

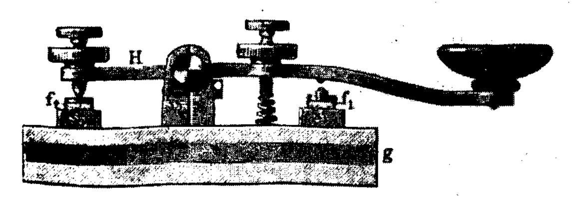


Abb. 6. Klopfertaste der Reichstelegraphenverwaltung, 1899

hörer als summende, durch Wechselströme hoher Frequenz am Empfangsort hervorgerufene Töne wahrnehmbar gemacht werden.

Mit der Anwendung dieser Mittel wurde schließlich die Grenze überschritten, bei der der Telegraphist die Zeichen noch handschriftlich aufzeichnen konnte. Man half dem Übelstand ab, indem man ihm

eine Schreibmaschine zur Niederschrift gab. Dann überstieg aber die Leistung des empfangenden Telegraphisten wieder diejenige des gebenden. Zum Ausgleich beschleunigte man nun das Senden, indem man die Morsetaste kleiner, leichter und handlicher gestaltete. So ließen sich mit dem Klopfer 90 Zeichen/min übermitteln.

Zur Gruppe der elektromagnetischen Schreibapparate gehört noch eine große Zahl von Geräten, die nach und nach für besondere Bedürfnisse entwickelt worden sind, die aber alle auf die Grundform des Morseapparats zurückgehen. Ein hervorragendes Beispiel dieser Sondergeräte ist der „U n d u l a t o r" von *Lauritzen,* der 1878 für den Betrieb von Seekabeln mittlerer Länge — 500 bis 1400 km — zur Anwendung kam. Über längere Telegraphenkabel muß wegen ihres beträchtlichen elektrischen Ladungsvermögens mit möglichst schwachen Strömen gearbeitet werden, auf die Farbschreiber der gewöhnlichen Bauart nicht mehr ansprechen. Es kam also darauf an, einen empfindlicheren



Abb. 7. Das Wort „Berlin" in der Kabelschrift mit Gleichstrom des Undulators von Lauritzen, 1878

Schreibapparat zu bauen. Das ist durch Anwendung eines polarisierten Elektromagnetsystems gelungen. Es besteht beim Undulator aus zwei — auch vier —nebeneinanderstehenden Elektromagneten mit entgegengesetzt gewickelten Spulen. Der Anker wird durch zwei halbkreisförmig gebogene, flügelartige leichte Stabmagnete gebildet, die an einer senkrecht zwischen den Elektromagnetpolen gelagerten drehbaren Achse befestigt sind. Unter dem Einfluß von Telegraphierströmen wechselnder Richtung wird der Anker rechts oder links herum gedreht. Die verlängerte Achse trägt an ihrem oberen Ende ein Heberröhrchen, dessen oberer Schenkel in ein Gefäß mit Anilintinte taucht, während der untere Schenkel auf dem gleichmäßig fortbewegten Papierstreifen lose aufliegt. Das Röhrchen bildet durch Kapillarwirkung eine Schreibfeder, die eine gerade Linie zieht, solange die Elektromagnete nicht von Strömen durchflossen werden. Ankommende Zeichenströme gleicher Richtung rufen bei Punktströmen kurze, bei Strichströmen längere Ausbiegungen der Linie nach derselben Seite hervor. Wird mit Strömen wechselnder Richtung gearbeitet, was aus verschiedenen Gründen meist notwendig ist, so schwankt die Schrift um die Mittellinie und es entsteht eine Wellenschrift; daher der Name Undulator. Der Apparat spricht schon auf

Ströme von 0,5 mA an und übertrifft damit die Empfindlichkeit des Normalfarbschreibers um mehr als das zwanzigfache; er leistet günstigstenfalls 400 Buchst./min.

Apparate mit beweglichen Stromleitern

Die Apparate dieser Gruppe nutzen die Erscheinung aus, daß ein im Magnetfeld beweglich angeordneter Stromleiter, z. B. eine leichte Drahtspule, sich nach dem Gesetz über die Anziehung magnetischer Pole dreht und, sobald sie von einem elektrischen Strom durchflossen wird, eine bestimmte Stellung einnimmt. Der Sinn der Drehung hängt von der Stromrichtung ab. Schickt man Telegraphierströme wechselnder Richtung durch die Spule, so lassen sich die dann eintretenden wechselnden Drehungen zur Bildung der Zeichen benutzen; es entsteht wie beim Undulator eine Wellenschrift. Die Empfindlichkeit solcher Dreh-

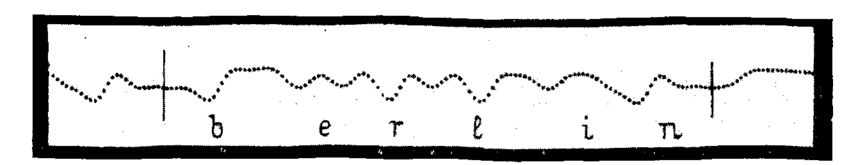


Abb. 8. Das Wort „Berlin" in der Kabelschrift des Heberschreibers von Sir William Thomson, 1867

spulenapparate läßt sich aber noch weit über die des Undulators steigern, sie werden daher zum Verkehr über lange Seekabel — über 1400 km — verwendet. Ihr am meisten zur Geltung gekommener Vertreter ist der schon 1867 von *Sir William Thomson* erfundene „Heberschreiber", der noch auf Ströme in den ankommenden Zeichen von 0,02 mA anspricht. Zur Erreichung dieser erstaunlichen Empfindlichkeit hat der Erfinder vor allem darauf Bedacht genommen, die Reibungswiderstände in den beweglichen, der Zeichenbildung dienenden Teilen soweit als möglich zu vermeiden. Die Drehungen der leichten Empfangsspule werden daher durch straff gespannte dünne Seidenfäden auf die Schreibfeder übertragen. Als solche wird wie beim Undulator ein leichtes Heberröhrchen benutzt, dessen freier Schenkel aber nicht unmittelbar auf dem Papierstreifen schleift, sondern nur darüber schwebt. Das Ausfließen der Tinte wird durch sehr schnelle Erschütterungen des Heberchens hervorgerufen. Dadurch entsteht auf dem ablaufenden Streifen eine Linie sich aneinanderreihender kleinster Tröpfchen, die aber wie ein ununterbrochener Strich erscheinen und daher die Lesbarkeit der wellenförmigen Schrift nicht stören. Die Telegraphiergeschwindigkeit des Heberschreibers ist an sich sehr be-

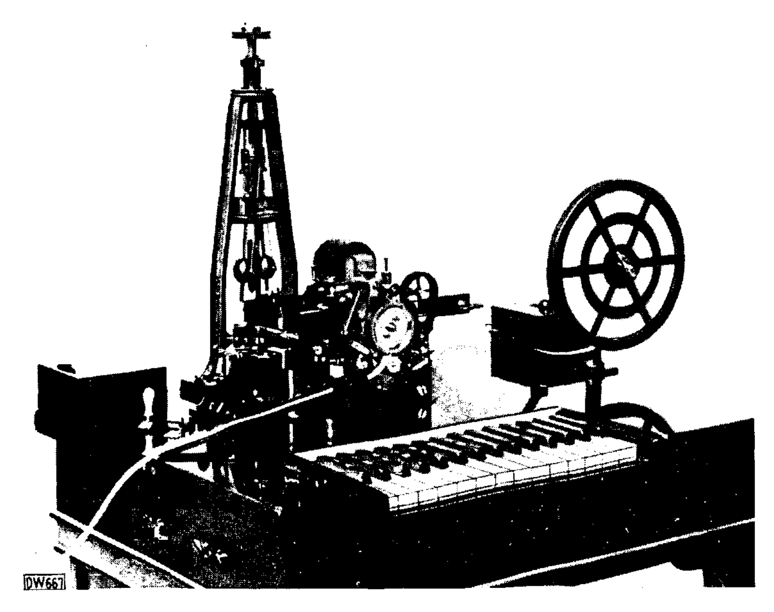


Abb. 9. Typendrucktelegraph von Hughes (deutsche Ausführung), 1898

trächtlich, kann aber nicht voll ausgenutzt und nicht über 400 Zeichen/min gesteigert werden, weil sonst die Eigenschwingungen des Hebersystems die Schrift verzerren.

Drucktelegraphen

Drucktelegraphen geben die zu übermittelnden Zeichen in für jedermann lesbarem Typendruck wieder und kommen dadurch dem Ideal eines Telegraphen am nächsten. Daher haben sich die Techniker schon von den ersten Anfängen der Telegraphie an bemüht, Drucktelegraphen zu entwickeln (in Deutschland *Siemens* und *Fardely,* in England *Wheatstone* und *Bain,* in den Vereinigten Staaten von Amerika *Brett* und *House).* Da aber in allen diesen ältesten Apparaten von dem Verfahren Gebrauch gemacht wurde, das sich drehende Druckrad, auf dessen Umfang die Buchstaben und Zeichen erhaben aufgraviert sind, durch von den Telegraphierströmen gesteuerte Schaltwerke schrittweise fortzuschalten und anzuhalten, sobald das zu übermittelnde Zeichen zum Abdruck bereit steht, hat sich mit ihnen die für den großen Weitverkehr erforderliche Telegraphiergeschwindigkeit nicht erzielen lassen; sie haben daher nur im Ortsverkehr als sog. „Ferndrucker" oder „Börsendrucker" Verwendung gefunden.

Der Engländer *D. E. Hughes* hat als erster von 1855 ab in mannigfaltigen Abwandlungen einen Apparat gebaut, der die Zeichen vom dauernd umlaufenden Typenrade gewissermaßen im Fluge abdruckt, und hat dadurch Schnelligkeiten erreicht, die auch für den großen Weitverkehr auf lange Zeit ausreichten. Der Apparat führt den Namen „Hughestypendrucker".

Das Drucken eines Zeichens wird dadurch bewerkstelligt, daß eine kleine Druckrolle, über die der Papierstreifen geführt ist, in dem Augenblick von unten gegen das umlaufende Typenrad geschnellt wird, in dem das gewünschte Zeichen vor der Druckrolle vorbeieilt. Ihr Emporschnellen wird durch einen vom fernen Amt eintreffenden Stromstoß herbeigeführt, den der gebende Apparat im richtigen Augenblick selbsttätig sendet. Der Telegraphist hat das rechtzeitige Senden des Stromstoßes nur durch Druck auf eine dem gewünschten Zeichen zugehörige Taste vorzubereiten. Voraussetzung für diese Arbeitsweise ist, daß der Sendeapparat mit einer dauernd umlaufenden Kontaktvorrichtung versehen ist, die sich gleich schnell wie das Typenrad des Empfängers und mit ihm gleichgestellt dreht. Die Druckvorrichtung wird nur für die Dauer des Druckvorganges mit dem Antriebslaufwerk des Empfängers gekuppelt. Für die Übermittlung eines Zeichens ist also nur ein Stromstoß erforderlich; die Übermittlung des gewünschten Zeichens ist durch den zeitlichen Abstand zweier aufeinander folgender Stromstöße bedingt. Zur Herstellung des richtigen zeitlichen Abstandes dient eine Klaviatur von 28 Tasten, von denen 26 einem Buchstaben und zugleich einer Ziffer oder einem Satzzeichen entsprechen. Jeder Taste ist ein Kontaktstift zugeordnet. Die oberen freien Enden der Stifte sind am Rande einer „Stiftbüchse" im Kreise gelagert. Beim Niederdrücken einer Taste wird der zugehörige Stift aus dem Deckel der Stiftbüchse, über der ein „Kontaktschlitten" dauernd kreist, herausgeschoben. Gleitet letzterer über einen herausgetretenen Stift hinweg, so verbindet er die Batterie mit der Leitung; es wird also ein kurzer Stromstoß zum fernen Amt gesandt.

Da die 26 zugleich mit einem Buchstaben und mit einer Ziffer oder einem Satzzeichen bezeichneten Tasten natürlich jeweils nur den Abdruck eines einzelnen dieser Zeichen herbeiführen dürfen, muß für den Übergang vom Buchstaben- zum Zahlendrucken und umgekehrt am Typenrad des Empfängers eine Umschaltung („Figurenwechsel") stattfinden. Sie wird vom Sender aus durch Niederdrücken einer der beiden nicht bezeichneten Tasten hervorgerufen, die außerdem zur Herstellung der Zwischenräume zwischen den Worten dienen. Auf dem Umfang des Typenrades sind die Buchstaben, Ziffern und Satzzeichen in der Reihenfolge angeordnet, wie sie durch die Bezeichnung der Tasten bedingt ist, nämlich 1 a 2 b 3 c usw. Durch die Umschaltung vor dem Übergang vom Buchstaben- zum Zahlenabdrucken und um-

gekehrt wird das Typenrad auf seiner Achse um die Breite eines Zeichens rechts- oder linksherum verschoben. Den beiden nicht bezeichneten Tasten des Senders entsprechen auf dem Typenrad in der Zeichenfolge zwei Lücken.

Sende- und Empfangsapparat stimmen in ihrer Bauart überein; es bereitet daher keine Schwierigkeiten, wenn der Betrieb es erfordert, den abzutelegraphierenden Text auch vom Sender mitdrucken zu lassen.

Die Herstellung und Aufrechterhaltung des Gleichlaufs und der Gleichstellung des Kontaktschlittens am Geber sowie des Typenrades am Empfänger war die schwierigste Aufgabe, zu deren Lösung auch deutsche Techniker im Laufe der Jahre viel beigetragen haben. Die günstigste Ausführung wurde schließlich im Zusammenwirken der von einem Elektromotor angetriebenen Schwungradachse mit einem Bremsregler und einer bei jeder Stromsendung eingreifenden mechanischen Korrektionsvorrichtung gefunden. Trotzdem ist die Aufrechterhaltung des Synchronlaufs der schwächste Punkt der sonst überaus geistreichen Bauart des Hughesapparats geblieben. Seine Leistung ist mit 200 Zeichen/min nach oben begrenzt; diese zu erreichen stellt indessen an die Geschicklichkeit der Telegraphisten große Anforderungen. Daher hat sich der Hughesapparat auf die Dauer im Betriebe nicht halten können. Immerhin ist er in vielen Länden zur Abwicklung des großen Weitverkehrs lange benutzt worden, u. a. von 1865 ab in Preußen und nachher im Reich bis in unsere Zeit.

Der Typendruckapparat von Baudot

Der Bau von Drucktelegraphen wird durch Verwendung von Zeichen, deren Übermittlungszeit gleich lang ist und die keine Zwischenräume benötigen, wesentlich vereinfacht. Das haben sich die Techniker bei allen nach der Entwicklung des Hughesapparats entstandenen Typendruckern zunutze gemacht. Jedes Zeichen muß durch eine bestimmte Anzahl sogenannter Stromschritte gebildet werden, die sich durch die Art der Ströme, z. B. ihre Richtung, und durch ihre Anordnung oder durch die verschiedene zeitliche Folge von Zeichenstrom und Strompausen voneinander unterscheiden. Am vorteilhaftesten hat sich das „Fünferalphabet" erwiesen, das aus je fünf verschieden geordneten Stromschritten gebildet wird. Von einem solchen Alphabet macht auch der von dem französischen Telegraphenbeamten *Emile Baudot* 1874 erfundene, in vielen Ländern Europas eingeführt gewesene Druckapparat Gebrauch, der auch in Deutschland, namentlich im Verkehr mit dem Ausland, Anwendung gefunden und den Hughesapparat durch seine Betriebssicherheit und große Anpassungsfähigkeit an die Verkehrsbedürfnisse zurückgedrängt hat. Zur Bildung und

Abgabe der Stromkombinationen benutzt *Baudot* einen aus 5 Tasten bestehenden Sender. Durch wahlweises Niederdrücken der Tasten, die in der Ruhestellung negativen Strom, in der Arbeitslage positiven Strom in die Leitung senden, können 32 Stromschrittgruppen geformt werden, mit denen sich unter Benutzung der Zeichenumschaltung (Figurenwechsel) die für den Betrieb erforderlichen 60 Zeichen darstellen lassen. Die 5 Stromstöße betätigen im Empfänger 5 Relais, deren Anker je nach der Stromrichtung an ihren Ruhe- oder Arbeitskontakt gelegt werden. Durch diese zum sogenannten Übersetzer gehörenden Relais werden „Sucher" eingestellt, die auf mechanischem Wege die Druckvorrichtung in dem Augenblick freigeben, in dem das der gesandten Stromkombination entsprechende Zeichen am Typenrad für den Abdruck bereit steht. Das Abdrucken erfolgt wie beim Hughesapparat auf einem Papierstreifen vom dauernd umlaufenden Typenrad. Die eigentliche Bedeutung des Baudot-Apparats liegt in seiner Anwendung als Mehrfachtelegraph. Wir werden bei Erörterung dieser Gruppe von Apparaten auf bauliche Einzelheiten des Baudot-Apparates zurückkommen.

Buchstabenreihe	Zeichenreihe		Stromschritte 1	2	3	4	5
A	-		▨	▨			
B	?		▨			▨	▨
C	:			▨	▨	▨	
D	◥		▨			▨	
E	3		▨				
F	◥		▨		▨	▨	
G	◥			▨		▨	▨
H	◥				▨		▨
I	8			▨	▨		
J	Kl		▨	▨		▨	
K	(		▨	▨	▨	▨	
L	)			▨			▨
M	.				▨	▨	▨
N	,				▨	▨	
O	9					▨	▨
P	0			▨	▨		▨
Q	1		▨	▨	▨		▨
R	4			▨		▨	
S	'		▨		▨		
T	5						▨
U	7		▨	▨	▨		
V	=			▨	▨	▨	▨
W	2		▨	▨			▨
X	/		▨		▨	▨	▨
Y	6		▨		▨		▨
Z	+		▨				▨
Bu			▨	▨	▨	▨	▨
Za			▨	▨		▨	▨
Zwr					▨		
WR						▨	
Zl				▨			
◥	◥						

Abb. 10.
Fünf-Stromschritt-Telegraphenalphabet

Die Maschinensender

Die Schnelligkeit des Sendens mit handbedienten Tasten findet ihre natürliche Grenze an der menschlichen Leistungsfähigkeit und Geschicklichkeit. Will man schneller senden oder muß auf besonders hohe Genauigkeit der Zeichenbildung Wert gelegt werden, so bedient man sich maschineller Sender. Eins der ältesten und im Grundgedanken noch heute benutzte Hilfsmittel ist der „Lochstreifensender". Bei ihm

werden die Zeichen in Form runder Löcher, einzeln oder zu Gruppen vereinigt, fortlaufend in Reihen in einen Papierstreifen gestanzt, wobei gleichzeitig eine Mittelreihe von Führungslöchern für den Ablauf des Streifens mitgestanzt wird. Den Streifen läßt man dann zwischen einer sich drehenden metallenen Walze und einem oder mehreren auf ihrem Mantel schleifenden Metallstiften hindurchlaufen. Werden die Walze mit dem Batteriepol und die Stifte mit der Leitung verbunden, so fließt Strom in die Leitung, sobald ein Stift über ein Loch hinwegstreicht. Die Lochstreifen werden entweder mit Handlochern hergestellt, die beim Niederschlagen eines von mehreren Stanzstempeln jeweils ein oder zwei Zeichenlöcher oder ein Zwischenraumloch

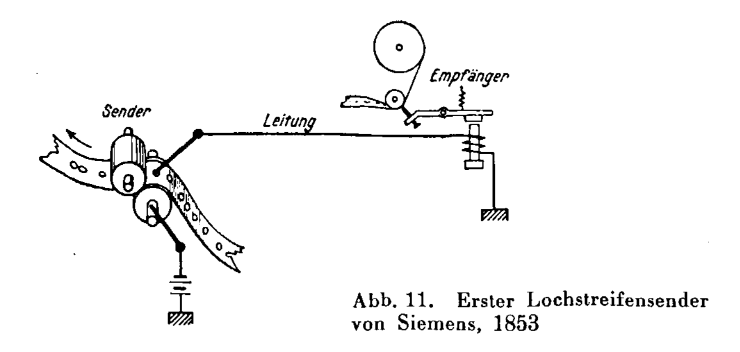


Abb. 11. Erster Lochstreifensender von Siemens, 1853

stanzen, oder mit Tastenlochern, die für jedes Zeichen eine besondere Taste enthalten und beim Anschlagen einer solchen alle zur Bildung des betreffenden Zeichens erforderlichen Löcher gleichzeitig herstellen. Dabei stehen die Löcher jedes Zeichens rechtwinklig zum Streifenlauf. Die Lochstreifensender sind fast so alt wie die elektrischen Telegraphen. Schon 1853 hat *Siemens* als erster einen Sender und Handlocher angegeben; 1858 folgte *Wheatstone* mit einem solchen für Morseschrift, der noch heute verwendet wird. In Verbindung mit schnellarbeitenden Empfängern bilden die Lochstreifensender besondere Schnelltelegraphensysteme, die Maschinen- oder Reihentelegraphen genannt werden.

Die Maschinentelegraphen

Für die Rentabilität der elektrischen Drahttelegraphie spielen die Kosten für die Leitungen, namentlich solcher von großer Länge, die ausschlaggebende Rolle. Daher muß auf eine möglichst gute Ausnutzung der Leitungen Bedacht genommen werden. Aus dieser Erkenntnis heraus hat man sich bemüht, die Telegraphiergeschwindigkeit, die im wesentlichen durch die Leistungsfähigkeit der Apparate bedingt

wird, immer weiter zu steigern. Die Aufgabe ist, wie wir gesehen haben, für die Sendeseite schon früh durch den Einsatz von Maschinensendern gelöst worden. Wesentlich schwieriger gestaltete sie sich indessen bezüglich der Empfangsapparate, weil hier nicht einfache Konstruktionsprobleme und Rücksichten auf die nicht unbegrenzte Schnelligkeit des Laufs der Telegraphierströme, namentlich in langen Kabelleitungen, hindernd im Wege standen. Erst 1867 ist der erste Maschinentelegraph für Morseschrift, den wir der Geschicklichkeit *Wheatstones* verdanken, in den Betrieb gekommen. Der Apparat hält sich an die Arbeitsweise des Morsefarbschreibers, ruft jedoch die Zeichen mit positiven, die Zwischenräume mit negativen Stromstößen hervor. Dementsprechend hat er als Empfangsorgan einen polarisierten Elektromagneten, der mittels eines äußerst schnell beweglichen Ankers das Farbschreibrädchen betätigt. Die Geschwindigkeit des Laufwerks läßt sich in weiten Grenzen regeln und dadurch die

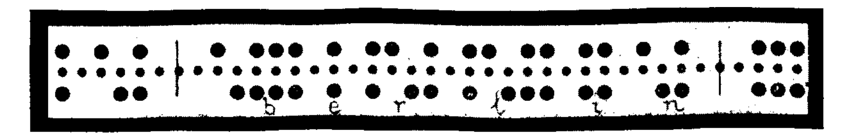


Abb. 12. Das Wort „Berlin" in der Lochstreifenanordnung für Morseschrift von Wheatstone, 1858

Leistung des Apparates der Verkehrslage leicht anpassen. In der vollkommensten Ausführung schreibt der Empfänger bis zu 1500 Buchst./min, während durch den Sender 36 m Lochstreifen laufen. Das ist eine außerordentlich hohe, im Betrieb selten ausgenutzte Leistung.

Die Herstellung von Maschinentelegraphen für Typendruck hat wegen der ungleich größeren konstruktiven Schwierigkeiten noch länger auf sich warten lassen. Nach den erst anfangs des Jahrhunderts entstandenen ersten Apparaten von *Creed* (England) und *Buckingham* (Amerika) stellte der Schnelltelegraph von Siemens & Halske von 1912 wohl die höchste Stufe dieser Entwicklung dar. Es ist nicht möglich, mit wenigen Worten die Einzelheiten seines kunstvollen mechanischen Aufbaus und der nicht einfachen elektrischen Vorgänge zu beschreiben. Erwähnt sei nur folgendes: Der Apparat benutzt das Fünferalphabet, dessen Stromkombinationen über einen Lochstreifensender durch 5 leichte Taster auf die Leitung übertragen werden. Jeder Taste im Geber entspricht ein „Aufnahme- und Übersetzerrelais" im Empfänger. Die gebenden und die empfangenden Organe werden mit Hilfe im Gleichtritt umlaufender Verteiler, nämlich der Senderscheibe des Gebers und des Empfangsrings im Empfänger, absatzweise so

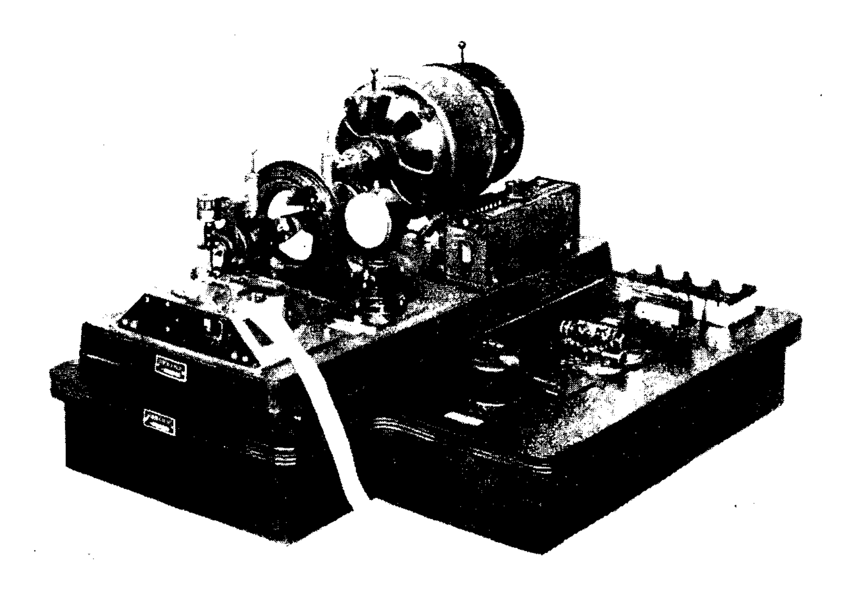


Abb. 13. Maschinentelegraph für Typendruck von Siemens & Halske, 1912
Sender

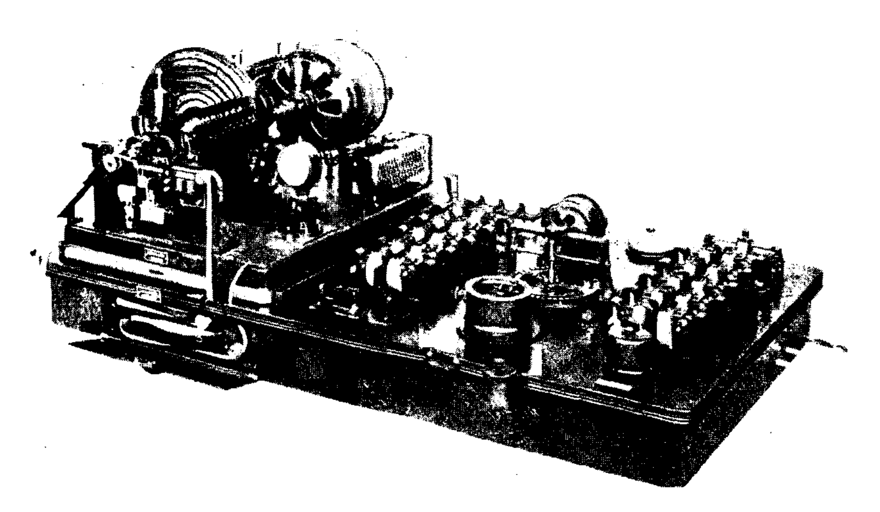


Abb. 14. Maschinentelegraph für Typendruck von Siemens & Halske, 1912
Empfänger ohne Schutzkasten

mit der Leitung verbunden, daß jedes Relais jeweils nur den Stromschritt erhält, den ihm die zugehörige Taste zuschickt. Für jedes Zeichen sind 5 Relaiseinstellungen nötig, die nacheinander zustande kommen, während die Verteilerbürsten beim Geber und beim Empfänger einmal umlaufen. Dabei schließen die Anker der Relais beim Ansprechen den Ortsstromkreis für den Druckelektromagneten, der, wie beim Hughesapparat, die Druckrolle mit dem Papierstreifen von unten her gegen das umlaufende Typenrad schnellt und dabei das in dem betreffenden Augenblick der Druckrolle gegenüberstehende Zeichen abdruckt. Die Leistung des Apparats ist sehr groß; sie ist regelbar zwischen 300 und 1000 Zeichen/min und beträgt im Betriebsdurchschnitt 700 Zeichen. Wegen dieser Spitzenleistung hat der Apparat im In- und Ausland schnell Eingang gefunden und im Weltkrieg auf deutscher Seite wesentlich dazu beigetragen, die Hochflut des Verkehrs im Felde und in der Heimat zu bewältigen.

Der Apparat von 1912 bildet eine Weiterentwicklung eines schon 1902 von *Wilhelm von Siemens* konstruierten Schnelltelegraphen, der durch seine doppelt so hohe Leistung von 2000 Zeichen/min berechtigtes Aufsehen erregte. Da die Massenträgheit bei einer so großen Schnelligkeit den mechanischen Abdruck der Zeichen nicht mehr zuläßt, wurden sie auf photographischem Wege festgehalten. Zu diesem Zweck sind Nachbildungen der Zeichen in Form kleiner Schablonen am Rande einer 2000 mal in der Minute umlaufenden Typenscheibe angeordnet. Die Schablonen streichen beim Umlauf der Scheibe vor einer Kassette vorbei, die einen lichtempfindlichen Empfangsstreifen enthält. Die vom Sender einlaufenden Telegraphierströme lösen dicht vor der Kassette die Entstehung eines Funkens in dem Augenblick aus, in dem die Schablone des zu übermittelnden Zeichens vor dem lichtempfindlichen Streifen vorbeiläuft. Dabei wird das Schattenbild der Schablone photographisch aufgenommen. Obwohl der geistvolle Apparat alle Aufgaben eines Schnelltelegraphen erfüllte, konnte er sich im Betrieb keinen dauernden Eingang erringen, weil seine Leistung über das Verkehrsbedürfnis weit hinausging; manche der in ihm verkörperten Konstruktionsgedanken sind aber in seinem bereits besprochenen Nachfolger von 1912 wieder aufgelebt. Aber auch diesem war dauernder Erfolg nicht beschieden. Die Erfahrung hatte nämlich gezeigt, daß bei der Betriebsabwicklung leicht Hemmungen entstehen, wenn die Telegraphiergeschwindigkeit der Apparate eine gewisse Grenze überschreitet. Treten z. B. längere Störungen in den Apparaten ein, was bei der starken mechanischen Inanspruchnahme einzelner Teile unvermeidlich ist, so gerät der Verkehr in Anbetracht der starken Regelleistung des Schnelltelegraphen sogleich ins Stocken. Ferner entstehen Verzögerungen, wenn das Lochen der Sendestreifen und die Verarbeitung der übermittelten Telegramme mit dem häufig wechselnden

Nachrichtenanfall nicht Schritt halten; denn es ist nicht möglich, für solche nicht voraussehbaren Fälle jederzeit genügend Hilfskräfte bereitzuhalten. Schließlich sind auch die die Telegrammübermittlung betreffenden Rückfragen sehr umständlich und zeitraubend. Man erkennt daraus, daß die Aufgabe eines idealen Telegraphen, zu jeder Zeit eine unverzögerte Übermittlung der Nachrichten sicherzustellen, durch Steigerung der Telegraphiergeschwindigkeit der Apparate allein nicht zu erfüllen ist. Besseren Erfolg erzielt man, wenn die Apparate einfacher und dadurch betriebssicherer gebaut werden, was nur durch Verzicht auf höchste Telegraphiergeschwindigkeit zu erreichen ist, und wenn man eine gute Ausnutzung der kostspieligen Leitungen durch Einrichtungen herbeiführt, die es ermöglichen, von mehreren unabhängigen Sendestellen aus Nachrichten über dieselbe Leitung zu schicken. Die Leitung wird dabei, wie man sagt, in mehrere „Kanäle" aufgeteilt. Verfahren dieser Art sind schon früh entwickelt worden und bilden heute in ihrer nach und nach erreichten, alle Erwartungen übertreffenden Vervollkommnung die wesentliche Grundlage für die Wirtschaftlichkeit der Telegraphie. Man faßt sie zusammen unter den Begriff „Mehrfachtelegraphie" und unterscheidet Einrichtungen für absatzweisen Betrieb und solche für gleichzeitigen Betrieb.

Die Mehrfachtelegraphen

Für die Entwicklung der Mehrfachtelegraphen für absatzweisen Betrieb war die Überlegung maßgebend, daß auch bei der Benutzung schnell arbeitender Apparate zwischen den vom Sender ausgehenden Zeichen immer noch Pausen eintreten, während derer die Leitung brach liegt. Diese Pausen lassen sich ausnutzen, wenn sie mit den Zeichen mehrerer Sender ausgefüllt werden. Dann muß man aber dafür sorgen, daß bei der sendenden und bei der empfangenden Stelle aufgestellte Verteiler die Leitung den zueinander gehörenden Apparaten in dem Augenblick zuteilen, wenn sie ihre Zeichen zu übermitteln haben. Dazu ist erforderlich, daß umlaufende Verteilerarme auf beiden Anstalten im Gleichlauf und im Gleichschritt gehalten werden, d. h. einen Umlauf in der gleichen Zeit vollenden und dabei jede Stelle der Verteilerscheiben im gleichen Zeitpunkt bestreichen. Werden die Sender von Hand bedient, so müssen die Telegraphisten durch einen Taktschläger ein Zeichen erhalten, wann sie senden sollen. Von dem lästigen taktmäßigen Arbeiten werden sie befreit, wenn mit selbsttätigen Einrichtungen gesendet wird. Für die Mehrfachtelegraphie dieser Art lassen sich Apparatsysteme verschiedener Bauart verwenden. Dabei kann man alle Apparate in derselben Richtung oder zum Teil in der einen, zum Teil in der entgegengesetzten Richtung arbeiten lassen.

Die weiteste Verbreitung als Mehrfachapparat für absatzweisen Betrieb hat der schon unter den Typendruckern erwähnte Apparat von

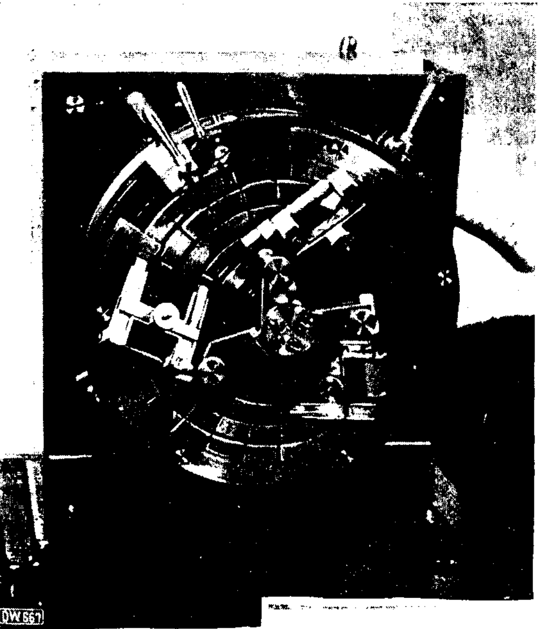


Abb. 15. Verteiler des Mehrfachtelegraphen für Typendruck von Baudot (in Deutschland eingeführt 1900)

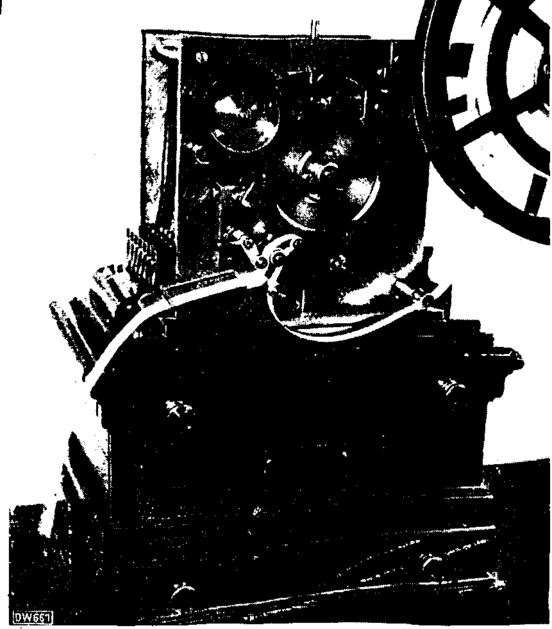


Abb. 16. Empfänger (Übersetzer und Drukker) des Mehrfachtelegraphen für Typendruck von Baudot

Baudot gefunden, der für Zwei-, Vier- und Sechsfachbetrieb eingerichtet worden ist. Bei dieser Verwendung muß der Verteiler also neben seiner Aufgabe, die Stromstöße des Fünferalphabets jedes Senders richtig der Leitung zuzuführen, auch die zusammengehörigen Apparatsätze der Sende- und der Empfangsseite nacheinander richtig der Leitung zuteilen. Das wird durch Umlaufen von Kontaktarmen mit Bürsten über einer „Verteilerscheibe" bewirkt. Da der Verteiler für die Stromschritte jedes Zeichens 5 Kontakte benötigt, müssen z. B. beim Zweifachbetrieb 2 mal 5 Kontaktstücke vorhanden sein, die in Form von Segmenten im Kreise auf der Verteilerscheibe angeordnet sind. An die Segmente sind auf der Sendeseite die Verbindungen zu den Tasten, auf der Empfangsseite die zu den 5 Relais angeschlossen. Der Verteiler und die einzelnen Empfänger sind für sich selbständige Apparate, die ihre eigenen Antriebsorgane haben. Auf beiden Ämtern steht je ein Verteiler. Nicht nur diese, sondern auch die zugeordneten Empfänger auf beiden Seiten müssen im Gleichlauf gehalten werden. Jeder Empfänger enthält das dauernd umlaufende Typenrad und mit ihm auf der gleichen Achse das ebenfalls umlaufende Druckrad. Auf dem Typenrad sind wie beim Hughesapparat die Buchstaben und Zeichen in abwechselnder Reihenfolge angeordnet, weshalb wie bei ihm auch der Figurenwechsel durch Verdrehen des Typenrades auf seiner Achse um die Breite eines Zeichens herbeigeführt wird. Da die Verteilerachse mit 180 U/min umläuft, übermittelt der Baudot-Apparat bei Zweifachbetrieb 360 und bei Vierfachbetrieb 720 Zeichen/min. Das ist eine Leistung, die derjenigen des Schnelltelegraphen von Siemens & Halske bei Einfachbetrieb gleichkommt. Die Einrichtungen des Baudotsystems sind aber, der leichteren mechanischen Aufgabe entsprechend, einfacher gebaut und daher betriebssicherer. In England hat ein ebenfalls recht leistungsfähiger Mehrfachtelegraph von *Murray* weitgehende Verwendung gefunden.

Mit einem Mehrfachtypendrucker für Fünffachbetrieb der Western Union Telegraph Co. in New York wird seit 1927 auch das deutsch-amerikanische Schnelltelegraphenkabel zwischen Emden und New York betrieben, über das in jedem Kanal der Leitung bis zu 360 Zeichen/min übermittelt werden können. Das ist eine für Seekabelbetrieb überaus hohe Leistung.

Zu den Mehrfachtelegraphen rechnet man auch Systeme, die die Leitung hauptsächlich durch Anwendung besonderer Schaltungen mehrfach auszunutzen gestatten. Sie werden unter der Bezeichnung „gleichzeitige Mehrfachtelegraphie" zusammengefaßt. Bei diesem Verfahren können Apparate verschiedener Bauart verwendet werden, ohne wesentlicher Änderungen zu bedürfen; es sind allerdings zahlreiche Hilfseinrichtungen erforderlich, die teils mit den

Apparaten, teils mit der Leitung in Verbindung zu bringen sind. Als solche seien erwähnt: „künstliche Leitungen", bestehend aus festen oder regelbaren ohmschen und induktiven Widerständen, ferner Kondensatoren, Simultanspulen, Drosselketten, Kondensatorleitungen, elektrische Weichen, Siebketten, Elektronenröhren, Relais verschiedenster Art, besondere Transformatoren, Batterien verschiedener Polarität und Spannung, Telegraphierströme in Form von Gleichstrom, Wechselstrom, Impulsstrom, Ströme mannigfaltigster Frequenz u. a. m. Dazu kommen als schaltungstechnische Mittel Differential-, Ausgleich- und Brückenschaltungen. Die große Zahl und Mannigfaltigkeit dieser Hilfsmittel läßt schon erkennen, wie verschlungen die eingeschlagenen Wege sind. Wir müssen uns daher auf einige Grundgedanken beschränken, die zu praktischen Erfolgen geführt haben.

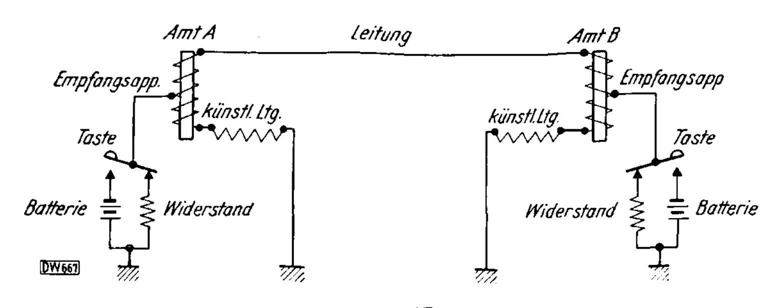


Abb. 17

Differentialschaltung zum Gegensprechen von Siemens-Frischen, 1854

Ursprünglich erstrebte man nur, gleichzeitig zwei Zeichen in entgegengesetzter Richtung über die Leitung zu senden (Gegensprechen). Brauchbare Lösungen dafür wurden schon in den fünfziger Jahren des vorigen Jahrhunderts gefunden und werden seitdem in mancherlei Abwandlungen in größtem Umfange benutzt. Die ersten Lösungen waren die Differentialschaltung von *Siemens-Frischen* (1854) und die Brückenschaltung von *Maron* (1863). Bei diesen Verfahren muß stets verhindert werden, daß die Empfangsapparate des gebenden Amtes auf die abgehenden Telegraphierströme ansprechen. Zu dem Zweck ist bei der Differentialschaltung die Elektromagnetwicklung in zwei Hälften geteilt und die Eintrittsstelle für den abgehenden Strom in die Mitte der Wicklung gelegt. Infolgedessen fließt der abgehende Strom durch beide Hälften in entgegengesetztem Sinne und verhindert, wenn beide Stromteile gleich stark sind, das Magnetisieren des Elektromagnetkernes; der Apparat kann also nicht ansprechen. Der ankommende Strom durchläuft dagegen vom einen Ende aus beide Wicklungshälften hintereinander in gleichem Sinne

und ruft dadurch die Magnetisierung der Kerne hervor. Um zu erreichen, daß beim Senden die beiden Stromteile in jedem Zeitabschnitt gleich stark sind, muß eine Regelungsmöglichkeit gegeben sein. Man legt daher an die eine zur Erde führende Wicklungshälfte eine aus regelbaren Widerständen bestehende „künstliche Leitung" an, die der wirklichen, mit der anderen Wicklungshälfte verbundenen Leitung in ihren elektrischen Werten genau gleich gemacht wird.

Für die Brückenschaltung nutzt man das Gesetz der Wheatstoneschen Brücke aus, d. h. man verwertet die Erscheinung, daß in der Brückendiagonale kein Strom fließt, wenn die Widerstände in den Brückenzweigen zueinander in einem bestimmten Verhältnis stehen. Man bildet aus der Telegraphenleitung und aus regelbaren Widerständen ein auf die beiden Ämter sich verteilendes Wheatstonesches Brücken-

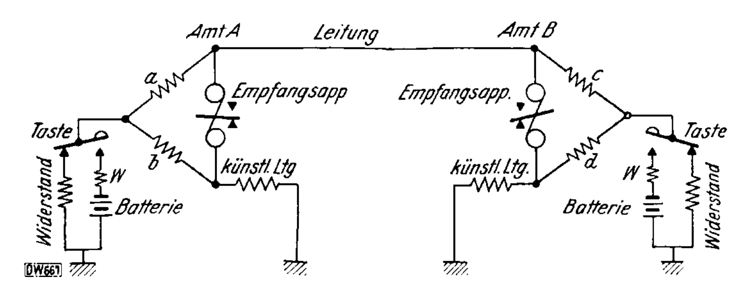


Abb. 18. **Brückenschaltung zum Gegensprechen von Maron, 1863**

system, in dessen Diagonale in beiden Ämtern die Empfangsapparate gelegt sind. Werden die Widerstände in den Brückenarmen und in der künstlichen Leitung richtig eingeregelt, so werden die Empfangsapparate vom abgehenden Strom nicht beeinflußt.

Mit diesen und anderen Mitteln der Schaltungstechnik ist auch das Verfahren des Doppelsprechens geschaffen worden, nach dem gleichzeitig zwei Telegraphenzeichen in derselben Richtung gesandt werden können, ferner aus einer Vereinigung des Gegensprechens und des Doppelsprechens das Doppelgegensprechen, auch Vierfachtelegraphie genannt, das ermöglicht, gleichzeitig zwei Zeichen in der gleichen und in der entgegengesetzten Richtung zu übermitteln. Von der Vierfachtelegraphie ist namentlich in England und in Amerika, wo sie hauptsächlich entwickelt worden ist (*Edison* und *Prescott*), viel Gebrauch gemacht worden.

Eine außerordentliche Förderung hat die gleichzeitige Mehrfachtelegraphie von 1920 ab erfahren, nachdem es gelungen war, mit Hilfe von Elektronenröhren oder besonderen Maschinen Wechselströme von bestimmter hoher Frequenz zu erzeugen, und diese zum Träger der

Übermittlung von Telegraphierzeichen zu machen (Wechselstromtelegraphie). Die zu benutzenden Frequenzen werden jede für sich in einem Schwingungsrohr erzeugt und von Senderelais, die von den Telegraphensendern betätigt werden, gleichzeitig in die Leitung geschickt. Das beim fernen Amt ankommende Frequenzgemisch wird durch „Siebketten" wieder in die Einzelfrequenzen aufgelöst. Die von *K. W. Wagner* in Deutschland und *G. A. Campbell* in den Vereinigten Staaten von Amerika während des Weltkrieges erfundenen Siebketten sind Kombinationen von Drosselspulen und Kondensatoren in verschiedener Anordnung, die nur Wechselströme von einer bestimmten Frequenzbreite durchlassen. Die aus dem ankommenden Frequenzgemisch herausgesiebten Einzelfrequenzen werden je in einem Röhrenverstärker verstärkt und darauf gleichgerichtet den Empfangsrelais zugeführt, die ihrerseits die Empfangsapparate steuern.

Man kann nun die dem Fernsprechweitverkehr dienenden Kabel für die Wechselstromtelegraphie mitbenutzen, was die Bereitstellung besonderer Telegraphenleitungen entbehrlich macht und daher aus wirtschaftlichen Rücksichten von höchster Bedeutung ist. Dann muß in erster Linie dafür gesorgt werden, daß die Wechselströme der Telegrammübermittlung die Fernsprechübertragung in benachbarten Adern desselben Kabels nicht induktiv stören. Das ist nur zu erreichen, wenn man zum Telegraphieren Wechselströme aus dem Frequenzbereich der Fernsprechströme wählt, die sich dann in ihrer Wirkung auf benachbarte Adern von den Fernsprechströmen nicht unterscheiden. Ferner müssen die Stromstärken der Telegraphierströme während ihres Verlaufs im Kabel in der Größenordnung der Fernsprechströme, also möglichst schwach, gehalten werden. Das in der Leitung fließende Frequenzgemisch muß dann aber vor seiner Aussiebung am Empfangsort wieder soweit verstärkt werden, daß die einzelnen Stromteile zum Betätigen der Relais ausreichen. Gegenwärtig arbeitet die Wechselstromtelegraphie in den deutschen Fernsprechkabeln mit 18 Kanälen, d. h. es werden 18 Frequenzbänder mit einer Breite von etwa 80 Hz über dieselbe Kabeldoppelleitung übertragen. Sie wird dabei nur in einer Richtung benutzt, während der Verkehr in der entgegengesetzten Richtung in einer Nachbarleitung abgewickelt wird. Damit ist indessen die Grenze dieser Art von Mehrfachtelegraphie noch nicht erreicht; in Verbindung mit den neuerdings zur Einführung gelangenden sogenannten Breitbandkabeln steht ihr noch eine viel weitergehende Entwicklung bevor.

Schließlich fallen in das Gebiet der gleichzeitigen Mehrfachtelegraphie auch die älteren Verfahren der „Simultantelegraphie", die eine Mitbenutzung von Fernsprechleitungen zum gleichzeitigen Telegraphieren mit Gleichstrom gestatten. Die

Simultantelegraphie wird noch heute überall in großem Umfang auf den Doppelleitungen des weiten Fernsprechverkehrs angewendet. Mit Hilfe einer Brückenanordnung wird aus den parallel geschalteten beiden Zweigen des rein metallischen Fernsprechweges der Hinweg für die Telegraphie gebildet, während die Erde als Rückweg dient. Dadurch wird erreicht, daß sich die Ströme der beiden Verkehrsarten nicht stören. Durch ähnliche Schaltungsmittel ist das Verfahren auch zu noch weitergehender Mehrfachausnutzung der Fernsprechleitungen für die Zwecke der Telegraphie ausgebaut worden (Vierer- und Achtertelegraphie).

Die neueste Art solcher Mehrfachausnutzung stellt die „Unterlagerungstelegraphie" dar, bei der über die der Sprachüber-

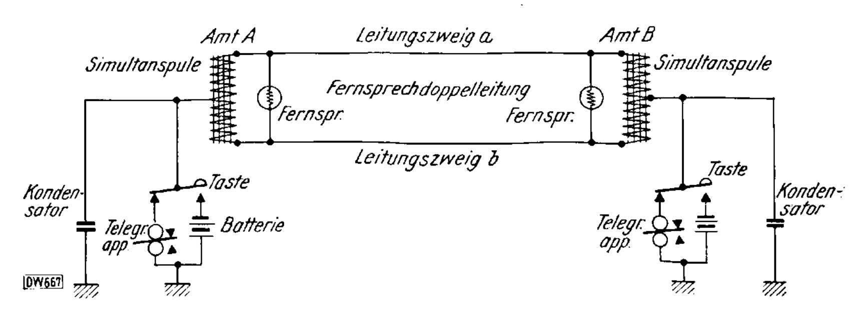


Abb. 19. Simultanschaltung zum Telegraphieren auf einer Fernsprechdoppelleitung nach van Rysselberghe, 1883

tragung dienenden Doppelleitungen gleichzeitig mit Gleichstrom auch ohne Erdrückleitung telegraphiert werden kann. Folgende Überlegung ist für dieses Verfahren maßgebend gewesen: Bei einer Geschwindigkeit von 600 Zeichen/min nach dem Fünferalphabet beanspruchen die Zeichen der Telegraphie ein Frequenzgebiet von 0 bis 50 Hz, während der der Übertragung der Sprache dienende Frequenzbereich zwischen 300 und 2700 Hz liegt. Gelingt es, den Übertragungsbereich einer Doppelleitung für den Fernsprechweitverkehr innerhalb der angegebenen Werte scharf abzugrenzen in ein Gebiet für telegraphische Nachrichtenübermittlung und in ein solches für die Übertragung der Sprachschwingungen, dann stören sich die beiden Verkehrsarten nicht. Die Abgrenzung ist durch „elektrische Weichen", bestehend aus Drossel- und Kondensatorketten, erreicht worden, wobei die Kondensatorketten den Telegraphierzeichen, die Drosselketten den Fernsprechströmen den Weg in die für sie nicht bestimmten Frequenzgebiete versperren. Auf diese Weise wird dem

Sprechkanal ein Telegraphierkanal „unterlagert", daher die Bezeichnung Unterlagerungstelegraphie.

Die Druckapparate nach dem Geh-Steh-Verfahren

Aus den vielseitigen Bedürfnissen und Erfahrungen der letzten 30 Jahre haben sich für die Weiterentwicklung der Telegraphie bestimmte Richtlinien ergeben, die sich durch nachstehende Forderungen kennzeichnen lassen:

1. Die technischen Einrichtungen sollen sich von jedermann ohne vorherige Übung handhaben lassen und eine einfache Wartung ermöglichen.

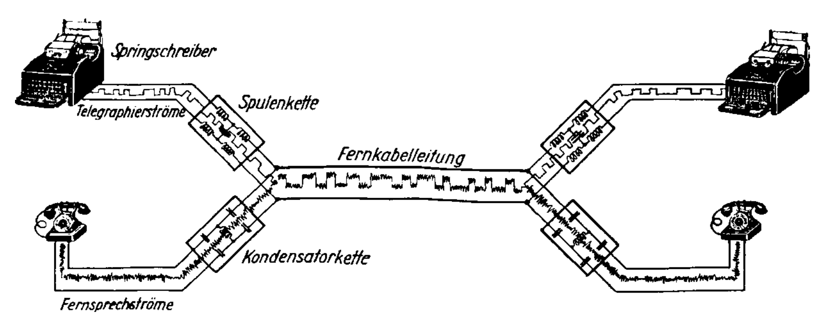


Abb. 20. Grundschaltung der Unterlagerungstelegraphie auf einer Fernsprechdoppelleitung im Kabel, 1927

2. Die Apparate sollen jederzeit betriebsbereit sein, ohne zeitraubender Einregelung zu bedürfen.
3. Die Sender müssen nach Bedarf von Hand oder maschinell durch Lochstreifen betätigt werden können.
4. Der Empfänger soll Druckschrift je nach Bedarf auf Streifen oder auf Blättern erzeugen; auf Verlangen soll er auch einen oder mehrere Empfangslochstreifen stanzen, die zum Weitersenden der Nachrichten in anderen Leitungen geeignet sind.
5. Die Apparate sollen nach Möglichkeit so gebaut sein, daß sie auch mit Einrichtungen anderer Ausführung zusammenarbeiten können. Dazu gehört, daß allgemein das gleiche Fünferalphabet angewendet wird.
6. Das Telegraphensystem soll nicht nur für den öffentlichen Verkehr geeignet sein, sondern sich auch zum unmittelbaren Nachrichtenaustausch zwischen Privaten verwenden lassen, wobei es gleich sicher über kurze und über weite Entfernungen arbeiten muß.

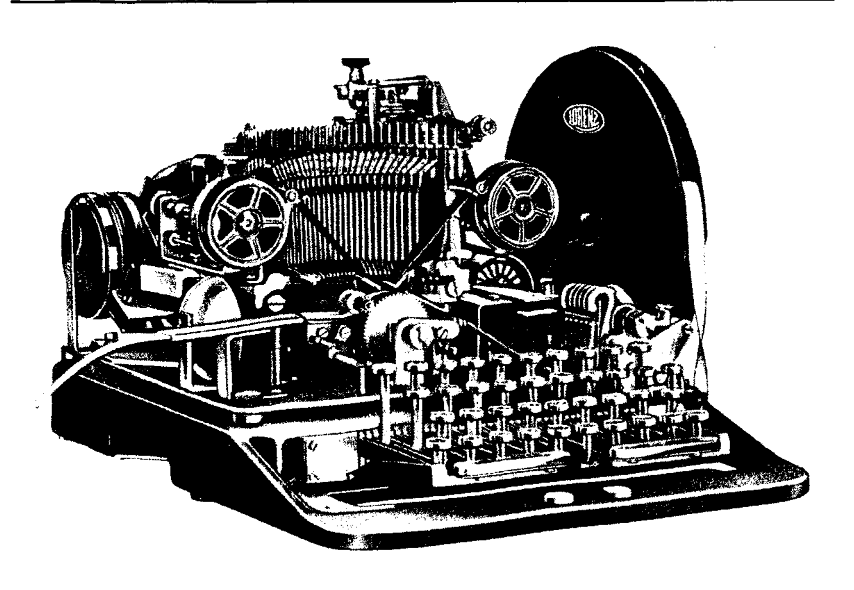


Abb. 21. Springschreiber der C. Lorenz A.-G. (System Morkrum-Kleinschmidt), Streifensender ohne Schutzkasten, 1928

7. Der Nachrichtenverkehr zwischen Privaten soll im Bedarfsfall auch an einer Vermittlungsstelle umschaltbar sein.
8. Zwischen der Ausnutzung der technischen Betriebsmittel und des Bedienungspersonals soll ein günstiger wirtschaftlicher Ausgleich bestehen.

Man erkennt aus diesen Forderungen, daß viele von den bisher gebrauchten Apparatsystemen und Betriebsverfahren mehr und mehr ausscheiden werden. Dazu gehören alle Reihenapparate mit besonders großer Telegraphiergeschwindigkeit, ferner alle Apparatsysteme, die mit dauernd im Gleichschritt umlaufenden Verteilern arbeiten und solche, die ein anderes als das Fünferalphabet benutzen. Darunter fallen also die Mehrfachtelegraphen für absatzweisen Betrieb, während diejenigen für gleichzeitigen Betrieb weitere Entwicklung und Anwendung finden werden.

Die meisten der angegebenen Forderungen sind inzwischen in den nach dem Geh-Steh-Verfahren, auch start-stop-System genannt, arbeitenden Telegraphen schon erfüllt. Ein Apparatsystem dieser Art wurde zuerst von *Creed* in England entwickelt. Während des Weltkrieges hat die Morkrum-Kleinschmidt-Corporation in Chikago

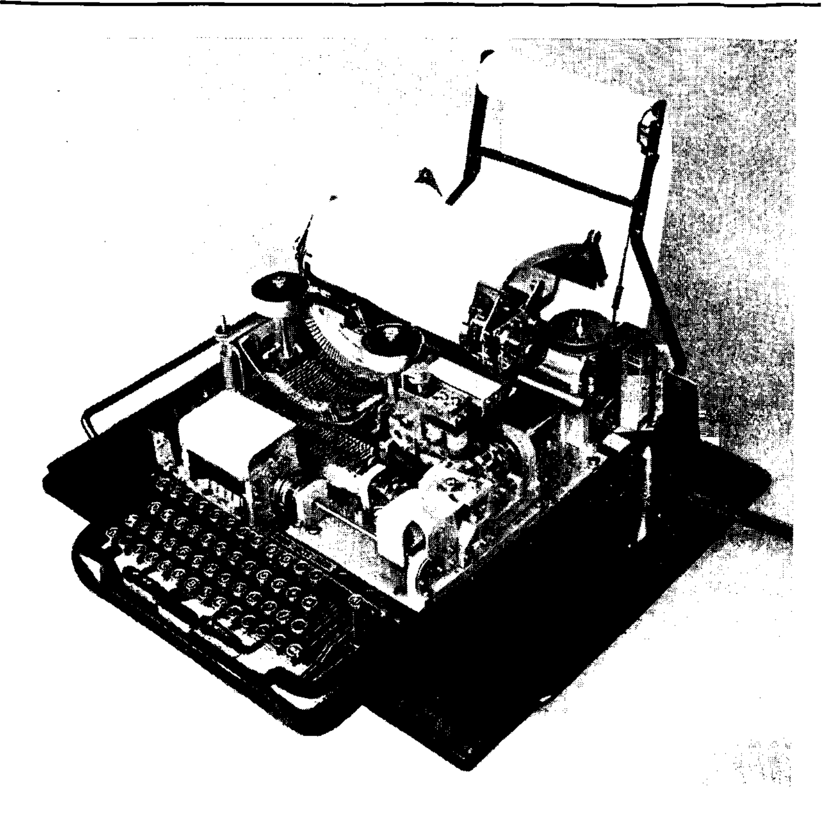


Abb. 22. Springschreiber der Siemens & Halske A.-G. für Blattdruck, ohne Schutzkasten, 1930

unter dem Namen „Teletype“ einen auf ähnlicher Grundlage beruhenden Apparat auf den Markt gebracht, der seit 1928 auch in Deutschland von der C. Lorenz A.-G. hergestellt wird. In seinem Heimatlande hat der Teletype schnell größte Verbreitung gefunden und beherrscht dort heute die öffentliche und die private telegraphische Verkehrsabwicklung. Gleichzeitig haben auch Siemens & Halske ähnliche Apparate eigener Bauart dem Betrieb zur Verfügung gestellt. Da bei allen Geh-Steh-Apparaten die Sende- und Empfangsorgane für jede Zeichenübermittlung bei laufendem Antriebsmotor von einer Ruhelage ausgehen, in die sie sogleich wieder zurückkehren, also gewissermaßen sprungweise arbeiten, haben sie in Deutschland die Bezeichnung „Springschreiber“ erhalten, werden aber auch „Fernschreib-

maschine" genannt, weil sie in der Handhabung den üblichen Schreibmaschinen ähneln.

Für die Zeichensendung wird ein Tastenwerk mit Typenhebeln benutzt, das demjenigen der gebräuchlichen Schreibmaschinen nachgebildet ist. Die Erfinder haben diese Form gewählt, damit der Apparat von jedem, der mit der Schreibmaschine umzugehen weiß, ohne besondere Übung gehandhabt werden kann. Das ist für die Verbreitung des Apparats von großem Wert. Durch Anschlagen einer Taste werden die nach dem Fünferalphabet gebildeten Stromschrittkombinationen (siehe Abb. 10) nebst den für den jedesmaligen Anlauf und das Anhalten des Sende- und des Empfangsmechanismus erforderlichen beiden Stromschritten unmittelbar auf die Leitung übertragen oder, wenn die Sendung durch eine Maschine vorgezogen wird, in einen Papierstreifen gestanzt, wozu natürlich zwei verschiedene Ausführungsformen gebraucht werden.

Im Teletype liegen unter den Tastenhebeln, auf die hohe Kante gestellt und rechtwinklig zu ihnen verlaufend, fünf Einstellglieder (Sendewählschienen), die sich über die ganze Breite des Tastenwerks erstrecken und nach rechts oder links verschieben lassen. Jede Schiene ist am oberen Rande mit einer Anzahl dreieckiger Einkerbungen versehen, die in Übereinstimmung mit den Stromschritten des Fünferalphabets geordnet sind. Beim Anschlagen einer Taste weichen die Wählerschienen einzeln nach rechts oder links aus, je nachdem, ob der Tastenhebel an der rechten oder an der linken schrägen Seite der Einkerbungen entlanggleitet. Durch die Wählerschienen werden über verschiedene mechanische Zwischenglieder, deren Wirkungsweise hier unerörtert bleiben soll, Sendekontakte gesteuert, welche die Stromschritte des der niedergedrückten Taste entsprechenden Zeichens nacheinander über einen Kontaktgeber auf die Leitung übertragen. Dazu ist notwendig, daß die Achse des Kontaktgebers durch den Anlaufschritt für die Dauer einer Umdrehung mit der durch einen Elektromotor dauernd in Umlauf gehaltenen Senderachse gekuppelt wird.

Der Empfänger muß die vom Sender ausgegangenen Stromschritte in Druckzeichen zurückbilden, wozu wie bei der Schreibmaschine Typenhebel benutzt werden, von denen der jeweils gewünschte vom Empfangsmechanismus herausgesucht wird. Zu diesem Zweck werden, ähnlich wie beim Sender, fünf mit nach dem Fünferalphabet geordneten Nuten versehene Empfangswählschienen unter Wirkung der ankommenden Stromstöße von dem einzigen vorhandenen Empfangselektromagneten nach rechts oder links verschoben und dabei so eingestellt, daß die Nuten der fünf Schienen in der Stromschrittfolge des übermittelten Zeichens übereinander zu liegen kommen. Dadurch wird von den Nuten ein Weg gebildet, in den ein dem gesuchten Typenhebel zu-

gehöriger Zugstab gezogen wird. Zugleich wird der Stab in die Bewegungsbahn eines allen Typenhebeln gemeinsamen Druckbügels gebracht, der bewirkt, daß der gesuchte Typenhebel auf den Papierstreifen geschlagen wird. Die Druckeinrichtung wird durch die vom Motor angetriebene Achse des Empfängers gesteuert. Zu dem Zweck wird der Druckmechanismus kurz vor dem Anhalten der Empfangsorgane mit der Antriebsachse gekuppelt. Der Abdruck der Zeichen erfolgt mittels Farbbandes auf einem schrittweise fortgeschalteten Papierstreifen; die Apparate können aber auch für Blattdruck gebaut werden.

Der Empfänger muß während einer Umdrehung etwas schneller laufen als der Sender, damit er bei jeder neuen vom Sender ausgehenden Betätigung bereits in die Ausgangsstellung zurückgekehrt ist. Dieser gewollte Ungleichlauf wird aber durch das am Ende jeder Umdrehung eintretende Anhalten wieder aufgehoben. Die Apparate stellen also den nur für die einzelne Zeichenübermittlung notwendigen Gleichlauf immer wieder selbst her. Dadurch wird die Bauart und die Betriebsweise wesentlich vereinfacht und zugleich die Vorbedingung für die vielseitige Verwendbarkeit des Springschreibers geschaffen. Selbstverständlich bleibt die Forderung eines annähernd gleichbleibenden Umlaufs für die Antriebsmotoren beider Apparate bestehen; diese läßt sich aber mit bekannten und bewährten Mitteln unschwer erfüllen.

Der Geber kann so schnell bedient werden wie im günstigsten Fall eine Schreibmaschine. Darüber hinaus hat man sich zwischenstaatlich geeinigt, daß die Apparate eine Höchstleistung von 428 Zeichen/min erreichen sollen. Da der Springschreiber unter Benutzung der bereits erwähnten Verfahren der Wechselstrom- und Unterlagerungstelegraphie betrieben werden kann, lassen sich an eine metallische Doppelleitung bis zu 12 Springschreiber anschalten, so daß bis zu 12 mal 428 = 5136 Zeichen/min übermittelt werden können. Das ist mehr als die fünffache Ausnutzung der Leitung gegenüber der mit dem Schnelltelegraphen von *Siemens* im Einfachbetrieb möglichen.

Der Springschreiber steht jetzt in Deutschland, sowohl in der Bauart der C. Lorenz A.-G. als in der von Siemens & Halske, nach der Zahl der im Betriebe befindlichen Telegraphenapparate an erster Stelle und ist dazu bestimmt, der Einheitsapparat nicht nur für den innerdeutschen, sondern auch für den zwischenstaatlichen Verkehr zu werden. Zu diesem Zweck hat man für die Bauart und Betriebsweise der verschiedenen Systeme bereits zwischenstaatliche Vereinbarungen getroffen.

Die große Betriebssicherheit des Springschreibers in Verbindung mit seiner verhältnismäßig geringen Kostspieligkeit, sowohl bezüglich der Beschaffungs- als auch der Betriebskosten, ferner die weitgehende Mehrfachausnutzung der Leitungen ermöglichten es, den Apparat als Fernschreibmaschine auch der deutschen Wirtschaft zum eigenen Austausch ihrer Nachrichten zugänglich zu machen. Die Deutsche Reichspost vermietet Leitungen oder Leitungskanäle des öffentlichen Netzes entweder zu Dauerverbindungen zwischen privaten Interessenten oder für feste Stunden oder sie stellt solchen Fernsprechteilnehmern, die sich eine Fernschreibmaschine beschafft haben, für Einzelverbindungen auch Leitungen des Fernsprechnetzes zur Verfügung. Sie hat ferner einen Fernschreibvermittlungsdienst innerhalb einer Anzahl großer Städte und zwischen diesen unter Bereitstellung besonderer, an Fernschreibzentralen angeschlossener Fernschreibleitungen eingerichtet. Durch deren Vermittlung können die Teilnehmer sich wie im Handfernsprechbetrieb nach Wunsch verbinden lassen, sie können die Verbindungen aber neuerdings auch nach dem Fernsprechselbstwählverfahren mit einer dem Fernschreiber beigegebenen Nummernscheibe selbst herstellen. Da der sendende Apparat von sich aus den empfangenden zum Anlauf und zum Stillstand bringt, braucht der empfangende Teilnehmer beim Einlauf einer Nachricht nicht anwesend zu sein. Durch eine vom Empfangsapparat selbsttätig übermittelte Meldung kann der sendende Teilnehmer sich überzeugen, ob er richtig verbunden ist. Seine Mitteilung kann er dann ebenso abgeben, wie er einen gewöhnlichen Schreibmaschinenbrief schreibt, wobei auch die gebende Maschine die Nachricht in sichtbarer Schrift mitschreibt. Die Schreibgeschwindigkeit kann der Schreiber nach dem Grade seiner Fertigkeit einrichten. Soll jedoch die höchste Leistungsfähigkeit des Apparats ausgenutzt werden, so kann die Nachricht zuvor in einen Lochstreifen gestanzt und mit dem Schnellgeber übermittelt werden. Seit 1934 hat die Deutsche Reichspost den öffentlichen Fernschreibvermittlungsdienst nach und nach auch auf das Ausland ausgedehnt. Damit hat die Telegraphie den Vorsprung und den in der Ermöglichung von Rede und Gegenrede bestehenden Vorzug des Fernsprechverkehrs weitgehend aufgeholt. An die Stelle des bisherigen Telegraphenverkehrs von Amt zu Amt ist jetzt der unmittelbare Gedankenaustausch von Teilnehmer zu Teilnehmer getreten. Damit ist zugleich die Forderung erfüllt, daß zwischen der Ausnutzung der technischen Betriebsmittel und dem Personalaufwand ein befriedigender wirtschaftlicher Ausgleich hergestellt ist. So ist der Springschreiber im Werdegang der elektrischen Telegraphie nicht nur zum Markstein, sondern wegen seiner kaum noch zu übertreffenden technischen Vollendung vielleicht für lange Zeit sogar zum Grenzstein geworden.

Die Bildtelegraphen

Die naturgetreue elektrische Übertragung von Zeichnungen, Lichtbildern, Schreib- und Druckschriften fällt zwar auch unter den Begriff der Telegraphie, unterscheidet sich aber doch wesentlich von der engeren telegraphischen Nachrichtenübermittlung. Während diese die Aufgabe hat und weitgehend erfüllt, reine Mitteilungen mit dem geringsten Zeitaufwand in beliebiger Druck- oder Schreibschrift dem Empfänger am fernen Ort zuzuführen, läßt sich mit der Bildtelegraphie eine so schnelle Überwindung von Raum und Zeit wegen der unabänderlichen Umständlichkeit des Betriebsverfahrens nicht erreichen. Die einzelne Bildübertragung erfordert eine Laufzeit von mindestens einer Stunde. Dazu kommt, daß Einrichtungen für Bildtelegraphie wegen der zu geringen Nachfrage und Kostspieligkeit des Verfahrens nicht wie der Nachrichtentelegraph an vielen Stellen über das ganze Verkehrsgebiet verbreitet werden können und daß daher zu der Dauer der elektrischen Übertragung in den meisten Fällen noch der viel längere Zeitbedarf für die Zustellung des übermittelten Bildtelegramms vom Aufnahmeort zum Aufenthaltsort des Empfängers, z. B. mit der Post, hinzutritt. Deshalb kommt die Bildtelegraphie für die eigentliche Nachrichtenübermittlung, auch in der Form faksimilierter Stenogramme, nicht in Betracht, gewinnt aber neuerdings als Mittel für die Übertragung von Bildern aktueller Zeitereignisse eine immer größere Bedeutung, namentlich für die Presse. Wegen dieser wertvollen Ergänzung zur Nachrichtentelegraphie waren es auch hauptsächlich die Telegraphentechniker, die sich schon früh mit dem schwierigen Problem befaßt und unter Ausnutzung der letzten wissenschaftlichen Erkenntnisse die Kunst der elektrischen Bildübertragung jetzt zu einer Vollkommenheit entwickelt haben, die kaum noch etwas zu wünschen übrig läßt. Wir verfügen heute über verschiedene Verfahren, die man als gleichwertig bezeichnen kann. In Deutschland wird hauptsächlich das Gerät von Siemens-Telefunken-Karolus und für Bedürfnisse, die eine einfachere Leistung, z. B. im Polizeidienst, zulassen, das Gerät von Lorenz-Korn gebraucht.

Die Bildtelegraphie hat die technische Aufgabe zu erfüllen, das auf der Sendeseite zu übertragende Bild in kleinste Bildelemente oder Bildpunkte zu zerlegen, diese in elektrische Ströme umzusetzen, die in ihrer Stärke den Lichtwerten der Bildelemente genau entsprechen, sodann die nach dem Empfangsort entsandten Ströme in Lichtpunkte rückzuverwandeln und diese auf geeignete Weise, z. B. photographisch, wieder zu einem wahrnehmbaren Gesamtbild zusammenzusetzen. Die Aufgabe schließt zugleich die wichtige Bedingung in sich, daß der Sende- und der Empfangsmechanismus in ihren sich bewegenden Teilen in genauestem Gleichlauf arbeiten müssen.

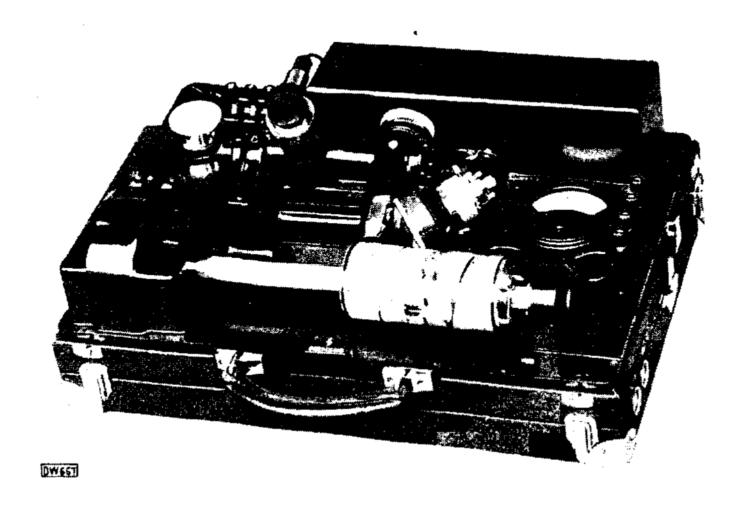


Abb. 23. Bildtelegraph von Siemens-Telefunken in Kofferform, 1935

Bei dem ältesten und auch heute noch meist geübten Verfahren der Bildzerlegung wird das Bild, das auf einer sich drehenden und dabei senkrecht zur Drehrichtung vorschiebenden Trommel aufgespannt ist, von einem feststehenden Lichtstrahl abgetastet. Der Lichtstrahl bestreicht das Bild in dicht nebeneinanderstehenden Zeilen und erzeugt so eine Art zerlegender Rasterung. Zur Umwandlung der Helligkeitswerte der Bildelemente in entsprechende Stromwerte wird das von den einzelnen Bildelementen zurückgestrahlte Licht auf eine „Photozelle" geworfen, die die Eigenschaft hat, bei Stromdurchgang die Stromstärke proportional zur auffallenden Lichtmenge zu ändern.

Auf der Empfangsseite müssen die übertragenen Stromwerte in Lichtwerte rückverwandelt werden. Dafür haben Telefunken-Karolus eine Einrichtung (Karolus-Zelle) entwickelt, die man als Lichtrelais bezeichnen kann. Indem das Relais von den ankommenden Stromimpulsen ihrer Spannung entsprechend beeinflußt wird, steuert es im gleichen Verhältnis einen Strahl polarisierten Lichts in seiner Helligkeit durch Drehung seiner Polarisationsebene. Der Lichtstrahl fällt auf lichtempfindliches Papier, das, wie auf der Sendeseite, auf einer sich drehenden Trommel aufgespannt ist und seitlich verschoben wird. Dadurch entsteht aus dicht nebeneinander liegenden Zeilen nach und nach eine photographische Kopie des auf der Sendeseite abgetasteten Originals.

Nachdem die Bildtelegraphentechnik um die Mitte der zwanziger Jahre zu einem hohen Grade der Vollkommenheit entwickelt war, hat die Deutsche Reichspost auch die Bildübertragung in den Bereich ihrer Aufgaben gezogen und seit 1927 ein Bildtelegraphennetz geschaffen, das heute sechs öffentliche Betriebsstellen umfaßt, die untereinander und mit zahlreichen öffentlichen Bildstellen im europäischen Ausland und in fünf außereuropäischen Ländern verkehren können. Daneben sind auch bei den hauptsächlich an der Bildübertragung interessierten Zeitungsunternehmen private Bildtelegraphenstellen eingerichtet worden. Neuerdings ist auch ein tragbarer Bildtelegraphensender entwickelt worden, der nach Bedarf an beliebigen Orten eingesetzt werden kann und zum ersten Male bei den Olympischen Spielen in Berlin mit vollem Erfolg angewendet worden ist.

Zur Vermeidung atmosphärischer Störungen werden für die Bildübertragung nach Möglichkeit metallische Leitungen benutzt. Nach überseeischen Ländern kommt vorläufig nur der drahtlose Weg in Betracht, der sich indessen ebenfalls hat gangbar machen lassen und damit dem neuen Verkehrsmittel den Weg um die Welt erschlossen hat.

Die Stromquellen für die Telegraphie

Als *Gauß* und *Weber* in Göttingen im Jahre 1833 als erste die Elektrizität in den Dienst der Nachrichtenübermittlung stellten, waren sie zur Erzeugung des elektrischen Stromes noch auf die 1799 von *Volta* gebaute und nach ihm benannte Voltasche Säule angewiesen, die aus abwechselnd aufeinandergeschichteten Kupfer- und Zinkplatten und zwischen ihnen eingelegten feuchten Tuchscheiben bestand. Bei der in „primären galvanischen Elementen" dieser Art sich abspielenden Umsetzung chemischer Energie in elektrische wird indessen der Energievorrat schnell erschöpft. Es lag daher auf der Hand, daß die 1831 von *Faraday* entdeckten Gesetze der magnetischen Induktion alsbald zur Erzeugung stärkerer elektrischer Ströme mit magnetelektrischen Maschinen nutzbar gemacht wurden. Auch der „Induktor" von *Gauß* und *Weber* war eine solche Maschine, die jedoch schon wenige Jahre später von den geschickten Händen *Steinheils* für seinen Telegraphen eine bequemere, betriebsichere Gestalt erhielt. Von jener frühen Zeit an ist die magnetelektrische und später die dynamoelektrische Maschine als Stromquelle für die Zwecke der Telegraphie beibehalten geblieben, aber doch nur für bestimmte, besonders dafür eingerichtete magnetelektrische Apparatsysteme oder für andere Sonderaufgaben, für die sich Wechselstrom besser eignete als Gleichstrom. Im allgemeinen wurden bis in die 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts die galvanischen Elemente bevorzugt, nachdem es 1836 *Daniell* gelungen war, den die „Inkonstanz" der ersten Elemente hauptsächlich verursachenden polarisierenden Wasserstoff durch Oxydationsmittel, den

Depolarisator, im Entstehen unschädlich zu machen. Unter der großen Zahl der seitdem entstandenen „konstanten Elemente“ sind in Deutschland hauptsächlich die „Kupferelemente“ benutzt worden, in denen eine Kupfer- und eine Zinkelektrode in einer Bittersalz- und in einer Kupfervitriollösung wirken, und späterhin auch solche von *Leclanché* (1865), der einen Zinkstab und einen aus einem Gemenge von Retortenkohle und Braunstein gepreßten Zylinder in eine Salmiaklösung stellte. Indem man den flüssigen Elektrolyten durch eine fast trockene plastische Masse ersetzte, entstanden Ende der 80er Jahre aus den nassen Zink-Kohle-Elementen die Trockenelemente, die sich ihrer bequemen Handhabung wegen bald auch im Telegraphenbetrieb, namentlich als Ersatzstromquellen für Störungsfälle, einführten.

Den primären Elementen können indessen wegen des schnellen Ansteigens ihres inneren Widerstandes nur verhältnismäßig schwache Ströme entnommen werden, sie eignen sich daher nicht zum gleichzeitigen Speisen vieler Telegraphenleitungen aus derselben Batterie. Verringert man den inneren Widerstand durch Parallelschalten mehrerer Batterien, so nimmt die Zahl der für den Betrieb benötigten Elemente in unbequemem Maße zu. Diese Nachteile wurden durch Anwendung von Sekundärelementen, auch Sammler genannt, überwunden. Jedes Sekundärelement stellt ein umkehrbares primäres Element dar, dessen Elektroden durch Zuführen elektrischen Stromes (Ladung) chemisch verändert und dadurch befähigt werden, unter chemischer Rückverwandlung wieder elektrische Energie abzugeben (Entladung). Bei Anwendung von nach Größe und chemischer Beschaffenheit geeigneten Elektroden lassen sich in den Sammlern sehr beträchtliche Energiemengen aufspeichern. Als zweckmäßigste Stoffe haben sich Elektroden aus Blei in verdünnter Schwefelsäure erwiesen, von denen sich während der Ladung die Anode mit Bleisuperoxyd, die Kathode mit schwammigem, chemisch reinem Blei überzieht. Leistungsfähige Verfahren zum „Formieren“, d. h. zum chemischen Aufbereiten der Elektroden sind erst nach und nach entwickelt worden, für den Telegraphenbetrieb sind daher Sammler erst seit Mitte der 80er Jahre zur Anwendung gekommen. Zur Ladung wird mit Dynamomaschinen erzeugter Gleichstrom benutzt.

Obwohl durch Einführung der Sammlerbatterien im Telegraphenbetrieb die Zahl der Elemente erheblich verringert wurde, bot der immer weiter steigende Strombedarf der großen Telegraphenämter doch den Anlaß, noch einen weiteren Schritt zu tun und den Telegraphierstrom unmittelbar durch Dynamomaschinen besonderer Bauart zu erzeugen. Beim Haupttelegraphenamt in Berlin sind 1915 solche Telegraphiermaschinen eingeführt worden. Ein Motor treibt vier

Stromerzeuger, deren Anker mit zwei Wicklungen versehen sind, die gleich hohe, aber entgegengesetzte Spannungen liefern. Die Spannungen sind von 20 zu 20 V abgestuft.

Schließlich ging man 1920 auch dazu über, die Telegraphenleitungen unmittelbar aus dem öffentlichen Elektrizitätsnetz zu speisen, indem man die Netzspannung über Spannungsteiler, Vorschaltwiderstände und Edelgasröhren als Spannungsbegrenzer in die für den Betrieb erforderlichen Stufen unterteilte.

Die Telegraphenleitungen

Als für die ersten Telegraphenapparate schon gebrauchsfähige Formen gefunden waren, herrschte noch weitgehende Unklarheit darüber, wie die Leitungen zwischen den Telegraphenstationen am zweckmäßigsten herzustellen seien. Selbst die wichtigste Errungenschaft für den Leitungsbau, die Benutzung des Erdreichs für die Rückleitung des Telegraphenstromes, die *Steinheil* im Jahre 1838 durch Versuche an der kurz vorher dem Betriebe übergebenen Eisenbahn Nürnberg—Fürth wieder entdeckt hatte, hatte sich so langsam verbreitet, daß *Morse* sie sechs Jahre später bei seinen ersten Telegraphierversuchen zwischen Washington und Baltimore noch nicht kannte. Man besaß in jener ersten Zeit weder Stoffe, mit denen die Drahtleitungen bei unterirdischer Führung zur Isolierung gegen Stromableitungen umkleidet, noch Isoliervorrichtungen, an denen sie bei oberirdischer Führung als blanke Drähte an geeigneten Befestigungspunkten aufgehängt werden konnten. Man schwankte daher zuerst überall zwischen ober- und unterirdischer Führung der Leitungen, die teils aus Kupfer, teils aus Eisen hergestellt waren. Als *Werner Siemens* 1847 die kurz vorher nach England gebrachte Guttapercha mit gutem Erfolg zum Isolieren der in den Erdboden zu legenden Leitungen verwendet hatte, empfahl die „Kommission für Versuche elektromagnetischer Telegraphen" des preußischen Kriegsministeriums im Jahre 1848 die ersten in Deutschland herzustellenden Telegraphenleitungen von Berlin nach Frankfurt a. M. und Köln unter Benutzung der Guttapercha unterirdisch zu verlegen. Der Vorschlag entwickelte sich indessen bald zu einem Mißerfolg, weil man in der Verarbeitung des neuen Stoffes noch nicht genügende Erfahrung besaß und u. a. den isolierten Leiter ohne äußeren Schutz in das Erdreich gebettet hatte. Schon nach kaum 3 Jahren sah sich die preußische Telegraphenverwaltung wegen des schnell fortschreitenden Verfalls der Leitungen genötigt, zur oberirdischen Führung überzugehen. Sie verwandte zunächst Eisendraht von 3 bis 5 mm Stärke, bis in die 80 er Jahre noch unverzinkt, und Isolatoren verschiedenster Formen aus Porzellan, an deren Stelle von 1858 ab die noch heute übliche Doppelglocke von *v. Chauvin* trat. Von 1900 an

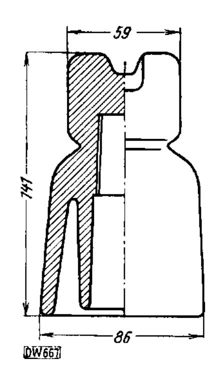


Abb. 24. Porzellandoppelglocke nach dem Vorschlag von v. Chauvin, 1858 (Reichsmodell I für Hauptlinien)

führte man des besseren Leitungsvermögens wegen für lange Leitungen Kupferbronzedraht und von 1908 ab Hartkupferdraht ein. Die Linien wurden teils an den Eisenbahnen, teils an öffentlichen Wegen geführt. Als die zunehmende Dichte des Leitungsnetzes das Durchbringen weiterer Leitungen erschwerte und die überlasteten Linien außergewöhnlichen Mehrbelastungen durch Rauhreif, Schnee und Eis nicht mehr standhielten, kehrte man in Deutschland von 1876 ab auf den wichtigsten Strecken wieder zur unterirdischen Führung zurück, konnte sich nun aber mit guter Aussicht auf Erfolg auf mehr als 25 Jahre alte Erfahrungen mit der Herstellung von Guttaperchakabeln stützen. Als Leiter wurden Kupferlitzen aus sieben Drähten von 0,7 mm Dmr. gewählt, die, mit Guttapercha umpreßt, zu 7 oder 4 zu einem Kabel vereinigt wurden. Die äußere Bewehrung der Kabel bestand aus verzinkten Eisendrähten. Das so ausgeführte große deutsche Landkabelnetz von rd. 5500 km Länge, das 221 Städte verband, hat sich vollkommen bewährt und ein kaum erwartetes Lebensalter von über 50 Jahren erreicht. Von der Jahrhundertwende an traten Kabelarten verschiedener Bauart an seine Seite, deren einzelne Adern mit getränkter Jutefaser oder Papierband umsponnen und in einen wasserdichten, mit eisernen Bewehrungsdrähten umgebenen Bleimantel eingeschlossen waren. Von der weiteren Auslegung besonderer Kabel für den Telegraphenbetrieb konnte Abstand genommen werden, als es gelang, die Leitungen des inzwischen entstandenen Kabelnetzes für den Fernsprechweitverkehr für den Telegraphenbetrieb mitzubenutzen

Die Geschichte der Seekabel beginnt 1851 mit der erfolgreichen Legung eines vieradrigen Guttaperchakabels Dover—Calais. Ihm folgten schnell weitere Seekabel mittlerer Länge und 1866 nach mehrfach mißglückten Vorversuchen die erste Verbindung über den Atlantischen Ozean von Irland nach Neufundland. Seitdem ist ein engmaschiges Netz von Seekabeln rund um den Erdball entstanden, das eine Länge von über 700 000 km mit einem Zeitwert von weit über 1 Milliarde RM aufweist. Deutschlands Anteil an diesem Seekabelnetz betrug bei Ausbruch des Weltkrieges rd. 43 000 km, wovon ihm nur 7600 km erhalten geblieben sind.

Kabel von mehr als 500 km Länge können nur mit einem einzigen Drahtleiter und mit Rückleitung durch das Erdreich betrieben werden;

mehrere Adern in demselben Kabel würden sich durch gegenseitige Induktion stören. Als Leiter wird eine Kupferlitze, als Isolierstoff Guttapercha verwendet; die Bewehrung wird in ihrer Stärke dem Grade der Beanspruchung des Kabels durch von außen wirkende Kräfte (Meerestiefe und Beschaffenheit des Meeresbodens) angepaßt. Bei den neuesten Seetelegraphenkabeln wird der Kupferleiter zur Erhöhung der Induktivität und damit der Telegraphiergeschwindigkeit, ähnlich dem bei Fernsprechkabeln üblichen Krarup-Verfahren, mit dünnen Metallbändern aus bestimmten Eisen-Nickel-Legierungen bewickelt. So ist auch das 1926 ausgelegte Kabel Emden—New York ausgeführt, dessen 3500 km langes Teilstück von Emden nach den Azoren die Norddeutsche Seekabelwerke A.G. in Nordenham angefertigt hat. Es erreicht eine Telegraphiergeschwindigkeit von 1800 Zeichen/min und kann in 5 Kanälen zu je 360 Zeichen/min betrieben werden. Diese überaus hohe Leistung übertrifft die der beiden früheren deutschen Seekabel nach New York, über die sich nur je 200 Zeichen/min im Gegensprechverfahren, also zusammen 400 Zeichen, übertragen ließen, um das 4½ fache. So ist allein durch den Fortschritt der Kabeltechnik der Verlust der früheren beiden deutschen Verkehrswege nach Amerika nicht nur aufgewogen, sondern erfreulicherweise zum Anlaß einer wesentlichen Verkehrsverbesserung geworden, die dem Bedürfnis noch lange genügen wird.

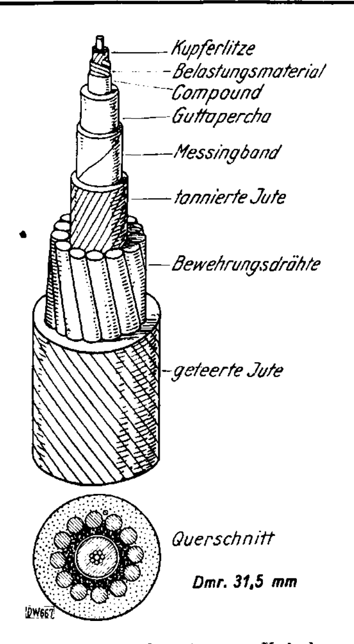


Abb. 25. Emden-Azoren-Kabel, 1926
Type B mit mittelstarker Bewehrung







Gemälde von unbekanntem Künstler im Besitz der Universitätsbibliothek Leipzig

Nikolaus Koppernick

geb. 19. Februar 1473 in Thorn
gest. 24. Mai 1543 in Frauenburg

Das Leben und Wirken des Nikolaus Koppernick,

genannt Coppernicus

Von *E. Zinner*, Bamberg *)

Am Beginn der neuen Zeit steht die große Tat des hervorragenden Sternforschers Nikolaus Koppernick. Sein Weltgebäude, auch Koppernickanisches Weltsystem genannt, bedeutet die Abkehr vom herkömmlichen Denken und den Versuch, auf neuem Wege an die Natur heranzugehen. Wie es dazu kam, mögen die folgenden Zeilen dartun.

Die Vorstellungen über die Himmelsbewegungen

Die Beschäftigung mit den Himmelserscheinungen ist uralt. Schon in ältester Zeit wurde die Sonne als die Lebensspenderin und der Mond als der geheimnisvolle Einteiler des Jahreslaufes verehrt. Die schrecklichen Finsternisse wurden als Warnung feindlicher Mächte oder der Götter gedeutet; es war wichtig, ihr Erscheinen vorherzusehen, um durch Buße das drohende Unheil abzuwenden. Und so begann man über den Lauf von Sonne und Mond nachzudenken und festzustellen, welche Zusammenhänge zwischen diesem Lauf und den Finsternissen bestünde. Man kam dabei zu recht merkwürdigen Entdeckungen, so daß man von einer dreifachen Bewegung des Mondes zu sprechen begann. Noch schwieriger wurde es, als man auch die fünf Irrsterne, auch Wandelsterne oder Planeten genannt, zu beachten begann. Wie rätselhaft war doch ihr Lauf! Bald schienen sie am Himmel dahin zu wandern wie Sonne und Mond entlang dem Tierkreis, bald blieben sie stehen oder gingen rückwärts; zwei von ihnen, Venus und Merkur genannt, waren überhaupt nur am Abend- oder Morgenhimmel zu sehen; sie schienen nicht gewillt zu sein die ganze Nacht zu leuchten und das Rätsel ihres Laufes den Menschen zu enthüllen. Jedoch die Menschen wollten hinter dies Geheimnis kommen, zu sehr hatten sie schon Sternenlauf mit Menschenschicksal verknüpft, zu sehr war ihnen die Lehre, daß sich im Schicksal der Staaten und der Menschen der Sternenlauf widerspiegele, in Fleisch und Blut übergegangen. Nunmehr galt es auf dem einmal beschrittenen Weg weiterzugehen und die Geheimnisse dieser rätselhaften Bewegungen zu enthüllen, damit die künftigen Himmelserscheinungen vorher berechnet werden könnten.

*) Der Verfasser ist Direktor der Remeis-Sternwarte. Von ihm erschienen bisher: Veröffentlichungen der Remeis-Sternwarte, Bd. I bis III. Verzeichnis der astronomischen Handschriften des deutschen Kulturgebietes. München 1925. Geschichte der Sternkunde. Berlin 1931. Untersuchungen zur Geschichte der Sternkunde. Bamberg 1932. Die fränkische Sternkunde im 11. bis 16. Jahrhundert. Bamberg 1934.

Die bloße rechnerische Feststellung, daß eine Finsternis nach so und so vielen Mondwechseln kommen werde, eignete sich nicht. Man versuchte daher, die Art der Bewegung dieser Planeten sich vorzustellen. So einfach wie die Bewegung des Sternhimmels, der sich in 24 Stunden einmal um die Erde bewegt, war sie offenbar nicht, obwohl es sich auch hier um eine Bewegung um die Erde als Mittelpunkt handeln mußte, wie schon der Anblick des Laufes von Sonne und Mond bewies. Sicherlich ruhte die Erde unbeweglich in der Mitte der Welt, umkreist vom Sternhimmel. Die tägliche Bewegung des Sternhimmels machte jeder der Planeten mit, hatte aber daneben noch eine besondere Bewegung, wie schon der Mondlauf zeigte. Diese Bewegung mußte kreisförmig sein; denn diese Bewegungsform war die der Natur gemäße, wie schon das Kreisen der unzähligen Sterne am Himmel bewies. Die bloße Kreisform genügte aber nicht; schon beim Lauf der Sonne gab es Schwierigkeiten. Und ähnlich war es beim Lauf des Mondes; wollte man die kreisförmige Bahnform beibehalten, so mußte man dazu annehmen, daß der Mond diese Bahn mit ungleichförmiger Geschwindigkeit durchlaufe. Dies war eine bedenkliche Annahme. Hatte man jemals gesehen, daß ein Stern bald rasch, bald langsam um die Erde kreise? Es galt daher eine zusätzliche Bewegung anzunehmen. Der Lauf des Mondes ließ sich dann so erklären, daß der Mond sich auf einer Kugelschale befände, die sich gleichförmig in der Zeit des Mondwechsels um ihre Achse dreht; diese Achse selbst ruht in einer anderen Kugelschale und deren Achse wiederum in einer anderen, die beide dazu dienen, die anderen Merkwürdigkeiten der Mondbewegung zu erklären. Und so konnte man sich auch die Bewegung der Sonne oder der Planeten als das Zusammenspiel verschiedener Kugelschalen vorstellen. Da sie nun alle an der täglichen Bewegung teilnehmen, so mußte man die Kugelschalen, angefangen vom Mond bis zum Saturn und bis zum Sternhimmel, ineinanderschachteln. Auf diese Weise erhielt *Aristoteles* ein Weltgebäude mit 47 Kugelschalen, also ein unübersichtliches Durcheinander von Schalen und Bewegungen, bei denen allerdings die Gleichförmigkeit der Bewegung um die ruhende Erde als Mittelpunkt der Welt gewahrt blieb. Trotzdem ließ sich dadurch die wirkliche Bewegung dieser 7 Himmelskörper nicht genau darstellen. Besser glaubte man das Ziel, nämlich die genaue Vorausberechnung der Himmelserscheinungen, dadurch zu erreichen, daß man den Himmelskörper wohl eine kreisförmige Bahn durchlaufen ließ, deren Mittelpunkt aber nicht die Erde sei, sondern außerhalb der Erde liege. Man konnte auch so vorgehen: der Himmelskörper bewegt sich auf einem Kreise, dessen Mittelpunkt gleichzeitig die Erde umkreist. Bei dieser aufkreisigen oder epizyklischen Bewegung war wohl die Erde noch der Bezugsort der Bewegung; immerhin war es mißlich, daß die wirkliche Bewegung um einen Punkt und nicht um die Erde selbst

erfolge; aber auch bei der anderen, schon erwähnten Bewegung, die man die exzentrische Bewegung nennt, mußte man Abweichungen von der herrschenden Lehre in Kauf nehmen.

Es mochte den Griechen schwer fallen, eine Entscheidung zwischen dem Weltgebäude des Aristoteles mit den vielen Kugelschalen und diesen neuen Annahmen der Bewegungen auf Aufkreisen oder exzentrischen Kreisen zu fällen. Für das Weltgebäude sprach die Vorliebe für die gleichmittige Bewegung um die Erde als Mittelpunkt; für die Neuerung aber die Beobachtung. Gewiß ließ sich auch diese Neuerung in die Vorstellung von den beweglichen Kugelschalen einbauen. So dachte sich *Ptolemaios* das Weltgebäude aus neun Kugelschalen bestehend, von denen die beiden äußersten dem täglichen Umschwung und dem Sternhimmel entsprechen, während die inneren den sieben Himmelskörpern vorbehalten sind, deren Bahnen, seien es nun aufkreisige oder exzentrische innerhalb der dicken Kugelschale liegen. Gewiß versuchte man die Himmelserscheinungen auch anders darzustellen. Man ließ die Venus sich um die Sonne bewegen oder auch, wie *Aristarch* vorschlug, die Erde sich um ihre Achse drehen und dabei um die Sonne bewegen. Jedoch blieb es bei diesen Einfällen, die keine Bedeutung erlangten.

Der Ausweg, die Bewegung der Planeten auf einem Aufkreis oder auf einem exzentrischen Kreise sich vollziehen zu lassen, genügte nur eine Zeit lang. Je mehr Beobachtungen vorlagen, um so mehr sah man sich veranlaßt, diese beiden Bahnformen mit einander zu verbinden oder sogar eine, von der Erde aus gesehen, ungleichförmige Bewegung anzunehmen, um die Erscheinungen in Einklang mit den Annahmen zu bringen. Schon *Ptolemaios* sah sich zu einem solchen Ausweg veranlaßt, wenn er seine Beobachtungen darstellen und die Grundlagen für eine richtige Vorausberechnung der künftigen Himmelserscheinungen liefern wollte. Soweit war das Altertum gekommen. Wohl hielt man an der Voraussetzung der in der Weltmitte ruhenden Erde und an der gleichförmigen Bewegung in einer Kreisbahn fest; aber im einzelnen sah man sich zu Ausnahmen genötigt und nahm auch die ganze Umständlichkeit der Berechnung eines so schwierigen Weltgebäudes in Kauf, um nicht auf die Vorausberechnung der künftigen Erscheinungen verzichten zu müssen.

Dieses Weltgebäude des großen griechischen Sternforschers *Ptolemaios* galt nunmehr als die Höchstleistung menschlichen Geistes mehr als 1000 Jahre lang. Gewiß fehlte es nicht an Einwänden, besonders von arabischen Gelehrten, die lieber mit *Aristoteles* die gleichförmige Bewegung auf Kreisbahnen um die Erde zugrunde gelegt hätten. Nicht selten wurde der Vorwurf laut, daß das Weltgebäude Mängel aufweise; aber man beruhigte sich bei dem Gedanken, daß die Sternforscher ohne dieses Gedankengebäude die Himmelserscheinungen

nicht vorausberechnen könnten. Und eine andere Möglichkeit zur Vorausberechnung gab es nicht. Wichtiger waren erst die Einwürfe *Heinrichs von Hessen*; denn seine Einwände gingen von der Beobachtung aus, wohl nicht von der Beobachtung der Ortsänderung, sondern der Größenänderung. So lautete einer seiner Einwände, daß der Mond bei seiner aufkreisigen Bewegung seine Größe sehr ändern müsse, was im Widerspruch zur Beobachtung stehe. Immerhin konnte auch er keine bessere Darstellungsart ersinnen und schloß mit dem Bekenntnis: „daß bisher keine bessere Darstellungsart ersonnen worden sei, noch daß sie jetzt gefunden werde".

Entsprach diese Darstellung wirklich dem Sachverhalt? Wurde dadurch der Planetenlauf richtig dargestellt? Was sagten dazu die Beobachter? Zuerst schwiegen sie; denn ihre damaligen Einwände gegen die Fehler der Vorausberechnung betrafen nur die den Rechnungen zugrunde liegenden Planetentafeln, aber nicht die Planetenlehre. Daran war nun nicht zu zweifeln, daß diese Planetentafeln manche Mängel zeigten und deshalb die darauf gegründeten Vorausberechnungen falsch sein mußten. Darüber hinaus war man nicht gekommen; es gehörte erst eine größere Aufmerksamkeit hinzu, um die Mängel der Tafeln von denen der Lehre zu trennen. Das geschah in Wien in der Mitte des 15. Jahrhunderts, als *Regiomontan* seine eigenen Vorausberechnungen der Planetenbewegungen mit den Himmelserscheinungen zu vergleichen begann. Bald fand er beim Mars erhebliche Abweichungen der Beobachtungen von den Rechnungen. Demgemäß konnten die benutzten Planetentafeln nicht richtig sein; fortgesetzte Beobachtungen ergaben ihm außerdem, daß es sich nicht um einen Fehler der Tafeln handle; vielmehr müsse die Lehre falsch sein, nicht nur beim Mars, auch bei Merkur und Venus, sogar beim Lauf von Sonne und Mond zeigten sich immer mehr die Mängel der herrschenden Planetenlehre, so daß ihm nur eine gründliche Verbesserung dieser Lehre einen Fortschritt zu bringen schien. Später teilte er mit, daß er zuerst die Bewegungen der Himmelskörper durch eine große Beobachtungsreihe festlegen und dann die Lehre verbessern wolle. Sein früher Tod — er starb 1476 mit 40 Jahren — verhinderte die Ausführung dieser großartigen Pläne. Sicherlich ging er dabei mit anderen Augen an die Sache heran, als seine Zeitgenossen, hatte er doch schon als Zwanzigjähriger von der Sonne als dem König im Königreich und dem Herz im Lebewesen gesprochen.

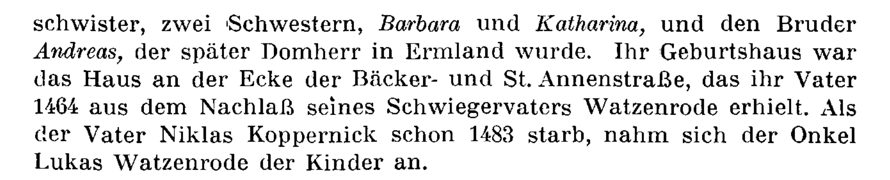
Außer Regiomontan beschäftigten sich damals zwei andere Deutsche mit dem Weltgebäude. Der bekannte Kardinal *Nikolaus von Kues* stellte nach Art der griechischen Philosophen Betrachtungen an, ob es kreisförmige Bewegungen gäbe und ob die Annahme zulässig sei, daß irgendein Himmelskörper, einschließlich der Erde, in Ruhe sei. Da nur Gott als Mitte der Welt ruhe, so müßten sich alle anderen Körper bewegen.

Mit solchen Gedanken ließen sich die Himmelserscheinungen nicht erklären oder darstellen. Auch der Regensburger Domherr *Johann Tolhopf,* der 1476 dem Papst eine Schrift über die Planetenbewegung überreichte, befaßte sich mit der Darstellung dieser Bewegungen und glaubte die damals als nötig angenommenen 34 Bewegungen auf 28 beschränken zu können. Solche Überlegungen waren nicht viel wert. Wichtiger war es, auf Grund neuer Beobachtungen unbefangen an die Darstellung der Himmelserscheinungen heranzugehen und die beste Darstellungsart zu finden. Dies tat *Nikolaus Koppernick.*

Seine Familie und Volkstum

Am 19. Februar 1473 wurde er als Sohn des *Niklas Koppernick* und der *Barbara Watzenrode* zu Thorn geboren. Seine Familie nannte sich wohl nach dem Dorf Köppernig bei Neiße in Schlesien. In Krakau lebte der Kaufmann *Johannes Koppernick,* der Großvater des berühmten Gelehrten. Wie alle aus Köppernig stammenden war er ein Deutscher; er heiratete die Tochter des Krakauer Bürgers *Peter Bastgert,* dessen Familie aus Oppau in der Rheinpfalz nach Krakau eingewandert war. Die jetzige polnische Großstadt Krakau war im 15. Jahrhundert eine größtenteils deutsche Stadt, in der die deutschen Kaufleute eine große Rolle spielten. Zu ihnen gehörten Johannes Koppernick und sein Sohn Niklas; dieser wanderte vor 1458 nach Thorn, heiratete hier um 1462 Barbara, die Tochter des altstädtischen Schöppenmeisters *Lukas Watzenrode* und wurde 1465 Schöffe zu Thorn. Die Stadt war damals zum größten Teil von Deutschen bewohnt. Ein Nichtdeutscher, ein Pole, hätte keinen Zutritt zu den ratsfähigen Familien gehabt. Schon daraus läßt sich ersehen, daß Koppernicks Vater sich als Deutscher fühlte. Er heiratete in eine Familie, die seit dem 14. Jahrhundert zum Rat Thorns gehörte. Lukas Watzenrode selbst war ein wohlhabender Kaufmann und besaß auch Landgüter. Seine Nachkommen gehörten zu den führenden deutschen Familien Ostdeutschlands. Der preußische Bund und damit Thorn unterstand dem König von Polen seit dem Thorner Frieden von 1466; aber die Deutschen in diesen Gebieten waren sehr darauf bedacht, ihr Volkstum und ihre Stellung zu wahren und setzten allen Bestrebungen des polnischen Königs, Polen in deutsche Stellen zu setzen, den größten Widerstand entgegen. Zu diesen Deutschen gehörten auch die Watzenrodes.

Lukas Watzenrode, der Sohn des alten Lukas, wurde nur gegen den Willen des polnischen Königs Bischof von Ermland und setzte sich für die Geltung der deutschen Sprache ein. Wie sein Neffe, Nikolaus Koppernick, der später Domherr in Ermland wurde, suchte er die Sonderrechte Ermlands gegen die Ansprüche des polnischen Königs zu wahren. In dieser Zeit des deutschen Kampfes um die Wahrung des Deutschtums wurde *Nikolaus Koppernick* geboren. Er hatte drei Ge-


schwister, zwei Schwestern, *Barbara* und *Katharina,* und den Bruder *Andreas,* der später Domherr in Ermland wurde. Ihr Geburtshaus war das Haus an der Ecke der Bäcker- und St. Annenstraße, das ihr Vater 1464 aus dem Nachlaß seines Schwiegervaters Watzenrode erhielt. Als der Vater Niklas Koppernick schon 1483 starb, nahm sich der Onkel Lukas Watzenrode der Kinder an.

Die Lehrzeit in Krakau und Italien

Koppernick dürfte zuerst die Schule in Thorn besucht haben; vielleicht kommt auch ein Schulbesuch in Kulm, aber nicht in Leslau (Wloclawek) in Betracht, bevor er im Jahr 1491 die Universität in Krakau aufsuchte. Damals war diese Stadt noch ein Mittelpunkt deutscher Kultur. Die deutschen Kaufleute hatten kurz zuvor in ihrer schönen Marienkirche den großen Altar von Veit Stoß aufstellen lassen. Die Universität, an der die deutschen Gelehrten *Albert Blarer, Johann von Glogau* und *Michael von Breslau* die Sternkunde lehrten, konnte als Vertreterin deutscher Wissenschaft gelten. Deshalb wurde sie sehr von deutschen Studenten besucht, die hier die stärkste Landsmannschaft bildeten. Für Koppernick mochten noch verwandtschaftliche Gründe — sein Schwager *Barthel Gertner* stammte aus Krakau — hinzukommen, die ihn bewogen, Krakau zuerst aufzusuchen. Da er später Geistlicher werden wollte, so mußte er zuvor die allgemeinen Fächer studieren. Für Krakau kamen zuerst Mathematik und Sternkunde in Betracht, die damals den Ruhm der Universität ausmachten. Die Werke der Wiener Gelehrten *Peuerbach* und *Joh. Müller von Königsberg,* genannt *Regiomontan,* wurden vorgetragen und eingehend erläutert, wie die noch jetzt vorhandenen zahlreichen Handschriften beweisen. Hier konnte Koppernick aber auch Schriften Regiomontans über dessen Meßgerät, den Dreistab, und dessen große Sinustafel (sinus $90° = 10\,000\,000$) lesen und daraus Anregungen erhalten.

Wie lange Koppernick sich in Krakau aufhielt, läßt sich nicht genau angeben. Spätestens im Oktober 1495 wurde er zum Domherrn am Frauenburger Dom ernannt, und damit gehörte er bis zu seinem Lebensende dem Frauenburger Domkapitel an; dadurch erhielt er die Mittel zur Fortsetzung seines Studiums in Italien. Die Stelle verdankte er seinem Onkel Lukas, der ihn wohl noch vor Antritt der Reise zum Priester weihte.

Zuerst suchte Koppernick 1496 in Italien die Universität Bologna auf, um hier das geistliche Recht zu studieren. Wie früher sein Onkel Lukas, so trat er der dortigen deutschen Landsmannschaft bei, die Polen bis 1574 nicht aufnahm. Der Aufenthalt in Bologna wurde für Koppernick besonders wichtig; denn hier lernte er den Astronomen *Dominicus Maria Novara* kennen und half ihm beim Beobachten. Novara war ein Schüler Regiomontans. Somit geriet Koppernick wieder in den

Bannkreis dieses großen deutschen Gelehrten. Hier konnte er auch dessen Pläne erfahren, zumal Novara aus Ferrara stammte und sicherlich die wichtigen Briefe Regiomontans an den dort lebenden *Giovanni Bianchini* kennengelernt hatte. Daneben konnte unser junger Gelehrter noch auf anderem Wege von den Gedanken seines Vorgängers hören. *Alexander Achillini* ließ 1498 in Bologna sein Werk über die Bahnbewegungen erscheinen, worin er die alten Einwände der Aristoteles-Anhänger gegen die Planetenlehre des Ptolemaios erörterte und dabei von einem Vergleich der Sonne mit dem König im Königreich und dem Herz im Lebewesen sprach; gewiß nannte er dabei Regiomontan nicht, konnte aber sein Wissen nur dessen Schriften entnommen haben. Da Achillini in seinem Buch die Polhöhe Bolognas als die seines Aufenthaltsortes angibt, so liegt die Annahme nahe, daß er sich gleichzeitig mit Koppernick in Bologna aufhielt und mit ihm verkehrte.

In Bologna begann Koppernick im Jahr 1497 die Himmelserscheinungen zu beobachten. Veranlaßt wurde er dazu durch den von Peuerbach und Regiomontan verfaßten Auszug aus dem Handbuch der Sternkunde des Ptolemaios; dieses Buch, das 1496 veröffentlicht wurde, gehörte zu Koppernicks Lieblingsbüchern. Allerdings handelte es sich in Bologna nur um einige Beobachtungen, um die Stellung des Mondes zu Sternen oder Planeten, wozu Geräte nicht nötig waren. Andererseits bestimmte er mit Novara die Schiefe der Sonnenbahn durch die Beobachtung der Mittagshöhe der Sonne, wozu wohl der Dreistab oder ein anderes Höhengerät verwendet wurde; auf gleiche Weise bestimmte er die Mittagshöhe der Spika. Daneben lernte er die griechische Sprache und versuchte sich im Übersetzen griechischer Schriften. In den Jahren 1497 bis 1499 erwarb er sich den Titel des Magister artium liberalium. Daneben studierte er das Recht. Vorübergehend hielt er sich in Rom auf, wo er am 6. November 1500 die Mondfinsternis im Beisein vieler Studenten und berühmter Männer und Künstler beobachtete. Für kurze Zeit kehrte er 1501 in seine Heimat zurück, um vom Frauenburger Domkapitel noch 2 Jahre Urlaub zu erhalten. Auf Wunsch des Kapitels studierte er nunmehr Medizin und zwar in Padua, allerdings ohne dieses Studium abzuschließen, während er seine Rechtsstudien durch die Erwerbung des Doktorhutes als Doktor der Dekrete zu Ferrara am 31. Mai 1503 beendete.

Seine Tätigkeit als Frauenburger Domherr

Dem Frauenburger Domkapitel gehörte Koppernick seit 1495 an; als er im Herbst 1503 nach Preußen zurückkehrte, wurde er in der Verwaltung beschäftigt. Zuerst gehörte er zum Hofe seines Onkels, des Bischofes Lukas Watzenrode, und hielt sich in Heilsberg auf; auch begleitete er ihn zu den preußischen Landtagen und zu den polnischen Reichstagen. Noch vor dem 1512 erfolgten Tod des Onkels wurde er zum

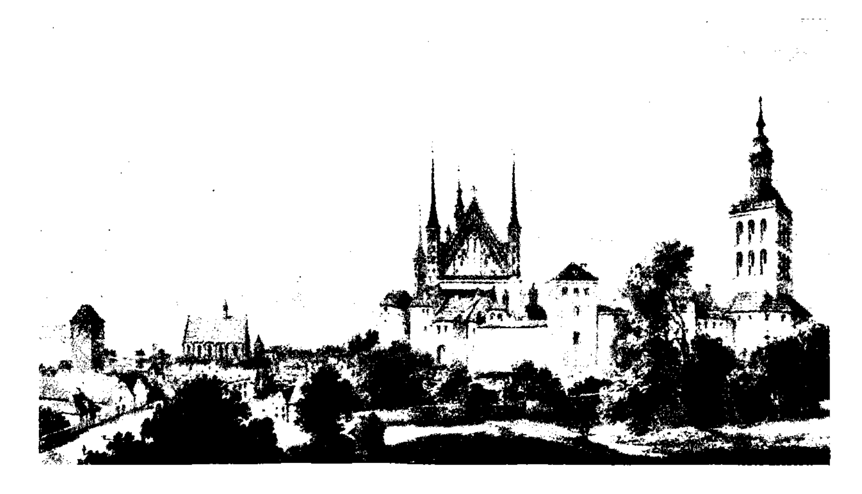


Abb. 1. Ansicht der Domburg zu Frauenburg

Kanzler des Frauenburger Domkapitels ernannt und wohnte nunmehr in der kleinen Stadt an der Ostsee, die er in den Jahren 1516 bis 1521 für längere Zeit verließ, um als Landpropst auf der Burg Allenstein das Gebiet zu verwalten. Auch später beteiligte er sich an der Verwaltung und nahm als Vertreter des Domkapitels oder des Bischofes an den preußischen Landtagen teil. Damals galt es, das Eindringen polnischen Einflusses nach Ermland zu verhindern. Als Koppernick in das Domkapitel eintrat, gab es nur deutsche Domherren; allmählich gelang es dem polnischen König, dem Bistum seinen Willen aufzudrängen und Polen zu Domherren zu machen. Das Domkapitel widersetzte sich diesem Eindringen des polnischen Einflusses bis zum äußersten: die ermländische Kirche weiterhin deutsch zu erhalten und keinen Polen einzulassen, dahin ging ihr Streben. Auch Koppernick gehörte zu diesen deutschen Domherren, hatte er doch seine Neigung schon in Bologna zur Genüge bewiesen. Sein Bruder *Andreas,* auch Frauenburger Domherr, zog sich besonders den polnischen Groll zu, weil er seine Vaterstadt Thorn in Rom gegen den polnischen Bischof von Plock vertrat und auch später gegen polnische Übergriffe vorging.

Angesichts dieses Eintretens Koppernicks für das Deutschtum seiner Heimat ist es selbstverständlich, daß er seine Briefe und Arbeiten, falls nicht lateinisch, in deutscher Sprache schrieb. Es gibt keine polnischen Schreiben von seiner Hand. Seine wissenschaftlichen Schriften (Commentariolus, die Streitschrift gegen Werner und sein Hauptwerk) sind lateinisch geschrieben, wie es damals üblich war. Dagegen legte

er seine Denkschrift über die preußische Münzordnung 1522 den preußischen Ständen in deutscher Sprache vor; die eingehende Begründung von 1528 ist lateinisch abgefaßt. Seine Briefe an den Herzog *Albrecht von Preußen* sind deutsch geschrieben. In seinen medizinischen Einträgen verwendete er nicht selten die deutsche Sprache.

Koppernick hatte in Padua Medizin studiert und wurde wegen seiner ärztlichen Kenntnisse zu Kranken gerufen. So mußte er dem Bischof *Mauritius Faber* in den Jahren 1529 bis 1537 verschiedene Male helfen, auch dessen Nachfolger *Dantiscus* und seinem Freund *Tiedemann Giese,* der Bischof von Kulm geworden war. Über seine ärztlichen Bemühungen wissen wir aus den noch erhaltenen Schreiben dieser Kirchenfürsten. Da wegen der Plünderungen der preußischen Archive nur ein Teil der Akten noch erhalten ist, so ist wohl anzunehmen, daß er nicht selten nach auswärts gerufen wurde. Dazu kamen gewiß häufige Notrufe aus der nächsten Umgebung. Wir dürfen daher annehmen, daß er nicht nur in der Verwaltung, sondern auch als Arzt seinem Lande diente.

Die preußische Münzordnung beschäftigte Koppernick für mehrere Jahre, von 1519 bis 1530. In Preußen waren die gebräuchlichen Münzen sehr in ihrem Wert gesunken, weil es zu viele Münzberechtigte gab — außer dem Bischof von Ermland und dem Hochmeister des Ordenslandes prägten auch die Städte Thorn, Danzig und Elbing — und zur Erzielung großer Gewinne der Silbergehalt der Münzen im Verhältnis zum Kupfer verringert worden war. Dies führte zur allgemeinen Münzverschlechterung und zur Teuerung, weshalb Koppernick schon 1519 Vorschläge zur Abstellung dieses Übelstandes machte. Eingehend erörterte er die Nachteile der Münzverschlechterung, an der nur die Goldschmiede verdienten. Er schlug für ganz Preußen eine einheitliche Münze, die nur in Ermland und im Ordensstaat geprägt werden dürfe, zugleich mit dem Verbot der früheren Münzen vor. Obwohl diese Angelegenheit auf mehreren Tagungen verhandelt und seine Vorschläge als geeignete Grundlage empfohlen wurden, kam es zu keiner Einigung.

Koppernick kam mit seinem Vorgesetzten, dem Ermländer Bischof, immer gut aus; nur mit *Joh. Dantiscus,* der von 1537 bis 1548 Bischof war, gab es Schwierigkeiten. Dantiscus, der als Domherr ein sehr weltliches Leben geführt hatte und berühmt durch seine Liebesgedichte und Liebschaften war, zeigte sich auf dem Bischofsstuhl als Eiferer. Ihm war die milde Denkungsart der Frauenburger Domherren verhaßt, weshalb er gegen einen von ihnen, *Alexander Sculteti,* die Anklage wegen Ketzerei erhob und seine Entfernung mit allen Mitteln betrieb. Da Koppernick mit Sculteti sehr befreundet war, so versuchte der Bischof auf Koppernick hinzuwirken, damit er den Verkehr mit seinem Freunde aufgäbe.

Auch auf einem anderen Gebiet mischte sich der Bischof in die Angelegenheiten der Domherren ein. Koppernicks Haushalt führte eine entfernte Verwandte *Anna Schillings.* Ihre Entfernung wünschte Dantiscus; Koppernick mußte nachgeben, obwohl es ihm bei seinem Alter — er war 65 Jahre alt — nicht leicht fiel, einen Ersatz zu finden. Selbst die Entfernung Annas genügte dem Bischof nicht; jeglicher Verkehr sollte unterbleiben, weshalb er Koppernick Vorhalte machen ließ, als Anna auf der Reise nach Königsberg ihn einmal flüchtig gesprochen hatte.

Sein Weltgebäude

Koppernicks Name ist mit einer Umwälzung auf dem Gebiete der Sternforschung verknüpft. Seine Gedankenarbeit bildet den Beginn der modernen Erforschung der Planetenbewegung und die Grundlage für die Forschungen *Brahes* und *Keplers.* Worin besteht nun seine große Leistung? Als er zu studieren anfing, herrschte noch die überlieferte Planetenlehre des Ptolemaios. Die dagegen erhobenen Einwände philosophischer Art konnten den Glauben an ihre Verwendbarkeit für die Vorausberechnung nicht erschüttern. Schwerwiegender waren Regiomontans Einwürfe; denn sie ergaben, daß die Lehre im Widerspruch zur Erfahrung stehe. Davon erfuhr Koppernick in Bologna; ebenso auch von Regiomontans Betonung der Stellung der Sonne im Planetenreich. Vielleicht erfuhr er auch, daß Regiomontan die Planeten Venus, Mars, Jupiter und Saturn mit ihren Bewegungen an die Sonne gekettet sein ließ und später von der Einwirkung der Erdbewegung auf die Bewegung der Sterne gesprochen hatte. Sei dem wie es will, sicherlich war Regiomontans Absicht, auf Grund einer großen Beobachtungsreihe eine neue Bewegungslehre zu schaffen, bekannt. Sein früher Tod hinderte ihn, diesen Plan auszuführen. Sein Unternehmen nahm auf und führte zu Ende ein anderer Deutscher, Nikolaus Koppernick.

Koppernick befand sich in einer günstigeren Lage als Regiomontan. Als Domherr brauchte er sich nicht um Gelderwerb zu sorgen und mußte nicht wie dieser seine Dienste Fürsten oder Bischöfen anbieten und ihnen seine Zeit opfern. In Frauenburg, wo er von 1510 bis 1543 meistens lebte, bewohnte er den Nordwestturm der Domburg. Vom obersten Stockwerk wie von einer benachbarten Plattform aus, konnte er seine Beobachtungen anstellen. Seine Beobachtungen erstrecken sich über die Jahre 1511 bis 1541, fallen aber hauptsächlich in die Jahre 1515 bis 1530 und 1536 bis 1538. Wie es damals üblich war, handelte es sich um die Beobachtung der Zeit der Verfinsterung der Sonne oder des Mondes, wohl mit Hilfe einer Wanduhr. Um 1515 wurde häufig die Sonnenhöhe mittags gemessen, um daraus die Besonderheiten der Sonnenbewegung zu bestimmen; auch wurde die Polhöhe Frauenburgs

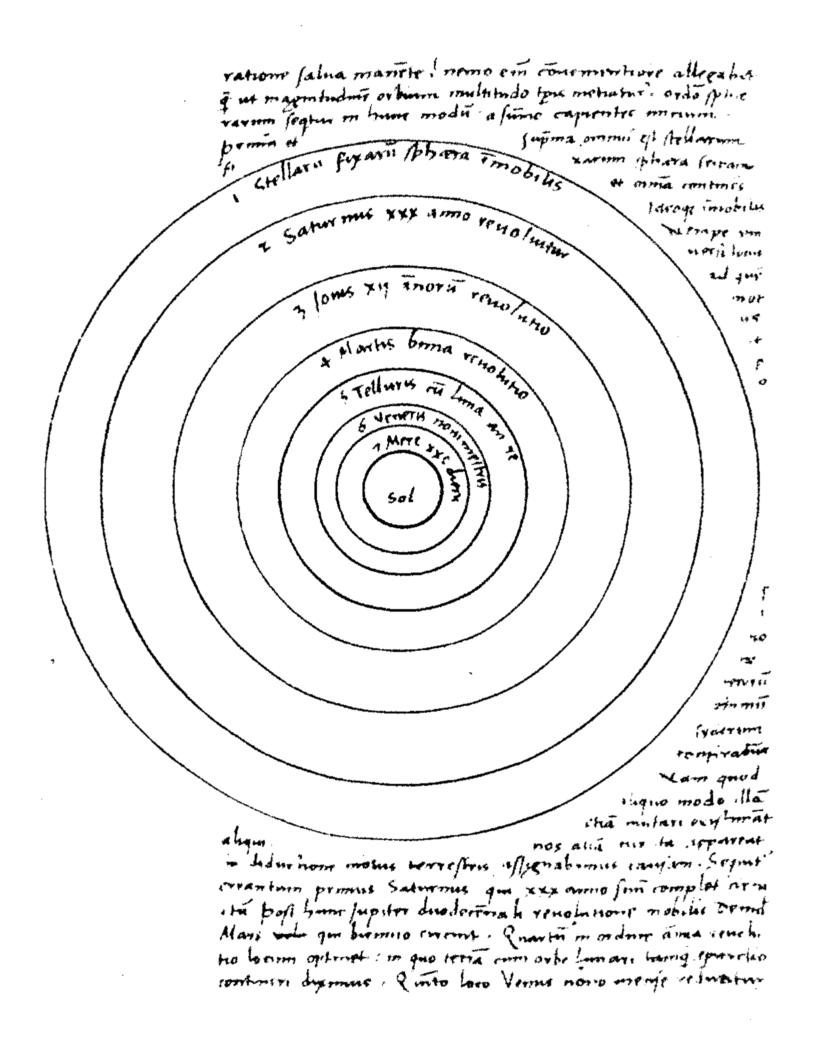


Abb. 2. Koppernicks Zeichnung seines Weltgebäudes

und die Mittagshöhe des Sternes Spika beobachtet. Diese Beobachtungen geschahen mit dem Dreistab, den Koppernick sich nach Regiomontans Vorschrift hergestellt hatte. Die Planetenbeobachtungen bestanden meistens aus der Schätzung des Abstandes des Planeten von einem bekannten, nahen Stern, wobei wohl ein Jakobstab verwendet wurde.

In einigen Fällen dürfte eine Armillarsphäre benutzt worden sein, ein aus mehreren, ineinander beweglichen Ringen bestehendes Gerät zur Ortsbestimmung der Himmelskörper. Allerdings muß dieses Gerät nur eine sehr einfache Teilung besessen haben, wie aus Koppernicks Beobachtungen hervorgeht.

Von den Planeten konnte er den Merkur nicht beobachten, wegen der nördlichen Lage Frauenburgs, und verwendete daher die Beobachtungen *Walthers,* des Schülers Regiomontans.

Außer den Beobachtungen bedurfte es auch rechnerischer Vorbereitungen, um das große Werk durchzuführen. Deshalb schuf Koppernick, wie früher Regiomontan, sich in seinen Sinustafeln und in seiner Dreieckslehre das Rüstzeug zur Bewältigung der Berechnungen, da die vom Altertum überlieferten Hilfsmittel nicht genügten.

Wie er nun auf Grund seiner Beobachtungen und dieser Hilfsmittel vorging, ist unbekannt. Vermutlich versuchte er zuerst die Mängel der herrschenden Lehre durch die Einführung gleichmittiger Bahnen um die Erde als Mittelpunkt zu beseitigen und damit zur gleichförmigen Kreisbewegung zurückzukehren, wie Regiomontan es 1463 getan hatte. Dieser Versuch konnte nicht befriedigen. Es lag nun nahe, durch eine Änderung des Bezugsortes aller Bewegungen, eine bessere Darstellung zu erzielen. Die Bedeutung der Sonne im Planetenreich war in der letzten Zeit genügend betont worden; auch wurde an den Hochschulen die Frage erörtert, ob durch die Annahme einer Drehung der Erde die Erscheinungen sich besser darstellen ließen. Darüber konnte kein Zweifel bestehen, daß im Fall einer Erddrehung die tägliche Drehung des Sternhimmels wegfällt und damit auch die Notwendigkeit, diese Bewegung des Sternhimmels mechanisch mit der Bewegung der anderen Himmelskörper zu verbinden, wenn man das ganze Weltgebäude darstellen wollte. Dies bedeutete eine wesentliche Vereinfachung des Weltgebäudes und damit einen großen Vorteil.

Gegen die Erddrehung wurde immer der Einwand erhoben, daß die in der Luft schwebenden Wolken und Vögel sich dann scheinbar entgegengesetzt zur Erddrehung bewegen müßten, da sie an ihr nicht teilnehmen könnten. Dieser Einwand verdiente Berücksichtigung. Dazu kam noch die jahrtausend alte Vorstellung von der ruhenden Erde, die durch den Anblick des Kreisens der Himmelskörper und der Sterne um die Erde bestärkt wurde. Und wenn Koppernick die Erde zugleich um die Sonne kreisen ließ, wie *Aristarch* es früher getan hatte, so kam zu diesen Einwänden noch die Bibelstelle (Josua 10, 12), worin *Josua* der Sonne befiehlt still zu stehen. Trotzdem versuchte Koppernick durch Änderung des Bezugsortes aller Bewegungen zu einer besseren Darstellung der Himmelserscheinungen zu gelangen. Die Annahme Aristarchs war damals bekannt; allerdings betraf sie nur die Bewegung der Erde um die Sonne und ließ die Wirkung dieser Bewe-

gung auf die anderen Planeten außer acht. Koppernick jedoch war sich der Wichtigkeit dieser Änderung bewußt. Die Erde ließ er jährlich um die Sonne sich bewegen; damit und mit der Erddrehung vermochte er den Unterschied von einem Tag zwischen der Jahresdauer gemäß der Sonne und gemäß den Sternen zu erklären. Ferner ergab sich die große Unregelmäßigkeit in der Bewegung der Planeten, die sich in ihrem Rückwärtsgang und Stillstand äußert, als selbstverständliche Folge der gleichzeitigen Bewegung der Erde um die Sonne. Daraus folgte, daß auch die Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn sich um die Sonne bewegen. Die Sonne selbst wurde als ruhend in der Weltmitte angenommen.

Die wichtigste Neuerung war die Drehung der Erde und ihre Bewegung um die Sonne; dabei wird sie vom Mond umkreist.

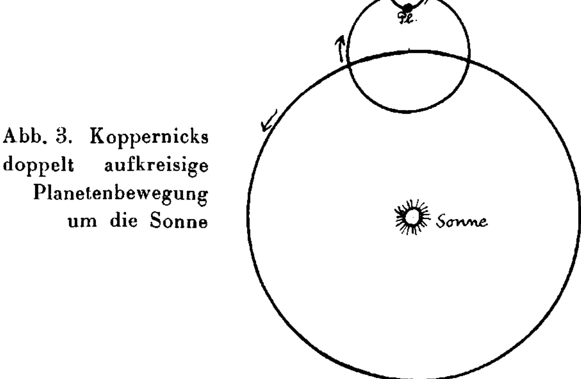


Abb. 3. Koppernicks doppelt aufkreisige Planetenbewegung um die Sonne

Für die Bewegung der Himmelskörper um die Sonne war ihre gleichförmige Bewegung maßgebend; somit hielt Koppernick an dieser Voraussetzung des Altertums fest. Um nun die scheinbaren Abweichungen von der gleichförmigen Bewegung zu erklären, sah er sich genötigt, die Bewegung der Erde nicht um die Sonne als Mittelpunkt, sondern um einen außerhalb der Sonne gelegenen Punkt erfolgen zu lassen. Bei den Planeten und beim Mond führte er eine zweimal aufkreisige Bewegung ein, d. h. er ließ den Planeten sich auf einem Kreise bewegen, dessen Mittelpunkt sich auf einem anderen Kreis bewegt, dessen Mittelpunkt erst die Sonne umkreist.

Alle Planetenbahnen sind gegen den Hauptkreis, nämlich den Tierkreis, geneigt, was zur Annahme weiterer Bewegungen führte. Für die Erde selbst wurde außer der jährlichen Bewegung noch die tägliche Drehung und eine Bewegung in Deklination angenommen. Diese Be-

wegung in Deklination sollte die schiefe Lage der Erdachse zur Tierkreisebene und zugleich die allmähliche Verlagerung dieser Ebene zum Äquator erklären. An der täglichen Drehung nimmt das Wasser und der nähere Teil der Lufthülle teil. Damit glaubte Koppernick den Einwand wegen der fehlenden Gegenbewegung der Wolken und Vögel zu entkräften. Andererseits ließ er den Sternhimmel soweit entfernt sein, daß die jährliche Erdbewegung keine Verschiedenheit im Anblick der Sterne verursacht.

Unter diesen Annahmen konnte er mit nur 34 Bewegungen alle Himmelserscheinungen darstellen, wie er sich in einer kleinen Schrift rühmte, die er vor 1514 verfaßte und wohl an seine Bekannten schickte. Diese Schrift „Nicolai Coppernici de hypothesibus motuum caelestium a se constitutis commentariolus" dürfte er nach 1502, vermutlich um 1510, verfaßt haben. Offenbar kam es Koppernick damals darauf an, das Weltgebäude des Ptolemaios durch ein anderes zu ersetzen, bei dem die große Unregelmäßigkeit in der Planetenbewegung beseitigt und die übrigen Unregelmäßigkeiten durch eine nicht exzentrische Bewegung dargestellt werden. Allerdings mußte er für die Erde eine exzentrische Bewegung um die Sonne annehmen und die andere wichtige Annahme machen, daß die himmlischen Kreisbewegungen nicht um denselben Mittelpunkt erfolgen. Es standen also großen Vorteilen nicht geringe Nachteile gegenüber. Deshalb sehen wir Koppernick in den nächsten Jahren beschäftigt Beobachtungen anzustellen und als Grundlage für den Ausbau seines Weltgebäudes zu verwenden.

Zuerst suchte er die Besonderheiten der Erdbahn zu ergründen. Dazu hatte er besonderen Anlaß, da damals Verhandlungen wegen der Kalenderverbesserung schwebten, bei denen die Kenntnis der genauen Jahreslänge wichtig war. Auf dem Laterankonzil, das zum 1. Dezember 1514 nach Rom berufen worden war, sollte auch die Kalenderverbesserung entschieden werden. Jedoch wurde dort nur ein Ausschuß unter Vorsitz des Bischofes *Paul von Middelburg* gewählt. Dieser Bischof wandte sich an Koppernick mit der dringenden Bitte, einen Vorschlag zu machen und seine Vorarbeiten einzusenden. Koppernick jedoch antwortete ablehnend. Noch sei der Lauf von Sonne und Mond nicht genügend untersucht, so daß er Sicheres nicht angeben könne; seine Vorarbeiten könne er nicht einsenden, da sie noch nicht abgeschlossen seien. Diese Anwort dürfte im Sommer 1515 erfolgt sein, als er sich mit der Beobachtung der Sonnenhöhen beschäftigte. Aus diesen Beobachtungen berechnete er die Zeiten der Sonnenwenden und Tagundnachtgleichen und die Örter der Erdnähe und Erdferne und stellte fest, daß diese Örter seit der Zeit des Ptolemaios ihre Lage zu den Sternen geändert hätten. Dies bedeutete schon einen Fortschritt.

Die Untersuchung der Sonnenbahn machte keine Schwierigkeiten; schon die Beobachtungen der mittäglichen Sonnenhöhe im Laufe eines

Jahres konnten die erwähnten Zeiten und Örter ergeben; mit Hilfe der beobachteten Finsternisse ließ sich die Mondbewegung untersuchen; viel schwieriger war die Untersuchung der Planetenbewegung, da ihm geeignete Geräte zur Beobachtung fehlten. Er verglich die Planeten in ihrer Lage zu benachbarten Sternen und entnahm deren Ort dem Sternverzeichnis des Ptolemaios. Allerdings blieb ihm nicht verborgen, daß die Genauigkeit der Ortsangaben dieses Verzeichnisses nicht groß ist, so daß die somit bestimmten Planetenörter keine allzu sicheren Schlüsse gestatteten. Bei der Verwendung dieses Sternverzeichnisses kam noch eine Schwierigkeit hinzu. Die Längenangaben des Verzeichnisses beziehen sich auf den Frühlingspunkt, d. h. den Schnittpunkt des Äquators und des Tierkreises, für das Jahr 137 n. Chr. Schon arabische Sternforscher hatten behauptet, daß das Sternverzeichnis für ein früheres Jahr gelten müsse, da Ptolemaios sich geirrt habe. Diese auch von Regiomontan geäußerten Zweifel waren Koppernick nicht unbekannt. Dann gab es noch eine andere Schwierigkeit: dieser Schnittpunkt verschiebt sich allmählich zu den Sternen; die Verschiebung wird Präzession der Tagundnachtgleichen genannt; sie wird durch die Abplattung der Erde verursacht, was damals unbekannt war. Selbst über die Art und Größe der Verschiebung gab es verschiedene Ansichten. Wenn Koppernick nun seine Beobachtungen an die Sterne anschließen und mit den Beobachtungen des Ptolemaios vergleichen wollte, so mußte er zuvor die Größe und Art der Präzession ermitteln. Dabei fand er, daß die arabische Trepidationslehre, wonach der Schnittpunkt im Laufe der Jahrhunderte vor- und rückwärts gehe, nicht richtig sei. Er wandte sich in einer 1524 verfaßten und an seinen Freund *Wapowski* gesandten Streitschrift scharf gegen den Nürnberger Gelehrten *Johannes Werner,* der noch vor kurzem diese Lehre verteidigt hatte. Die Einwände sind richtig, wenn auch nicht verschwiegen werden darf, daß Koppernick später in seinem Hauptwerk für die Präzession eine Abnahme von der Zeit des Ptolemaios bis zur Gegenwart, also auch eine Änderung, feststellte. Allerdings hatte Werner zur Erklärung des Umstandes, daß sich immer andere Werte ergäben, je nachdem verschiedene Beobachtungen miteinander verglichen werden, Fehler in den griechischen Beobachtungen angenommen und damit Koppernick sehr erzürnt, der betonte, daß Ptolemaios nirgends größere Sorgfalt als hier angewandt habe. Erst allmählich änderte Koppernick seine günstige Meinung über die griechischen Beobachtungen und Angaben. Noch in seinem Hauptwerk äußerte er keinen Zweifel an der Genauigkeit der Angaben des Ptolemaios, obwohl ihn die Abnahme des Präzessionswertes wohl stutzig machen konnte, und erst nach dessen Vollendung, kurz vor seinem Tod, sprach er von seinen Bedenken wegen der griechischen Beobachtungen und empfahl dringend die neue Beobachtung der Örter der Sterne. Die Berechnung der Planetenörter

und der Präzession mußte hier so eingehend erörtert werden, um zu zeigen, welches die Grundlagen seines Weltgebäudes waren und wie Koppernick erst allmählich von seinem Glauben an die Vortrefflichkeit der griechischen Angaben abkam und mit eigenen Augen die Himmelserscheinungen anzusehen sich getraute.

In diesen Jahren, etwa von 1515 bis 1530, änderte er nicht nur die Darstellung der Bewegungen, worüber noch zu sprechen ist, sondern fand auch aus dem Vergleich seiner eigenen Beobachtungen mit denen des Altertums, daß die Bahnen der meisten Planeten sich im Laufe der Zeit geändert hatten; dasselbe deuteten auch seine Beobachtungen der Venus von 1532 an; jedoch unterließ er es, in seinem Hauptwerk darauf hinzuweisen.

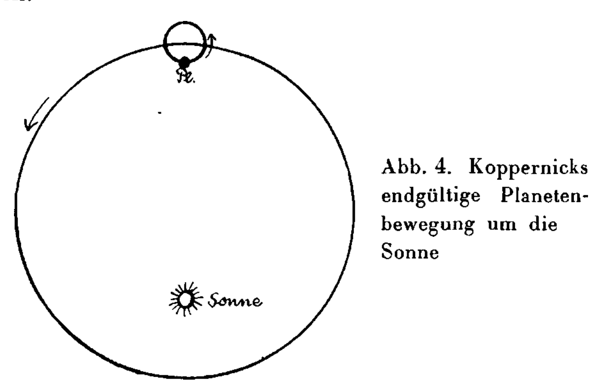


Abb. 4. Koppernicks endgültige Planetenbewegung um die Sonne

In welcher Weise verwendete er seine Beobachtungen zur Darstellung der Planetenbewegungen? Zuerst kam die Prüfung seines im Commentariolus beschriebenen Weltgebäudes. Die grundlegenden Annahmen der Erddrehung und der Sonne als Bezugsort aller Bewegungen wurden beibehalten; dagegen ließ er die doppelt aufkreisige Bewegung — außer beim Mond — fallen und kehrte zu der von alters beliebten Annahme der aufkreisigen Bewegung auf einem exzentrischen Kreis zurück. Da *Ptolemaios* die Ableitung solcher Bahnformen aus den Beobachtungen in seinem Handbuch der Sternkunde ausführlich auseinandergesetzt hatte, so benutzte Koppernick dieses Verfahren zur Berechnung seiner eigenen und der von Ptolemaios mitgeteilten Beobachtungen, um einerseits für die Gegenwart und andererseits für die Vergangenheit die Bahnform abzuleiten und Veränderungen festzustellen. Auf diese Weise fand er die schon erwähnten Veränderungen.

Die Berücksichtigung der Beobachtungen bewirkte, daß manche Zusätze zu den ersten Annahmen nötig waren. So behielt er für die

Erde wohl die drei Bewegungen um ihre Achse, um die Sonne und in Deklination bei, fügte aber noch periodische Schwankungen, Librationen genannt, hinzu, um die Präzession erklären zu können.

Bei der Bewegung der anderen Planeten wären wohl ähnliche Zusätze nötig gewesen, wenn viele Beobachtungen zur Verfügung gestanden hätten. So beschränkte Koppernick sich darauf, aus je drei Beobachtungen die Form der Bewegung abzuleiten; beim Merkur benutzte er drei Beobachtungen *Walthers*.

Zur Untersuchung der Bewegung der Planeten in Breite standen ihm keine eigenen Beobachtungen zur Verfügung, weshalb er von den griechischen Beobachtungen ausging.

In jahrzehntelanger Arbeit hatte Koppernick ein Werk geschaffen, das die Grundlage der neuen Sternforschung bildet. Seine Ergebnisse legte er in seinem Hauptwerk „De revolutionibus orbium caelestium libri sex" (Sechs Bücher über die Umdrehungen der himmlischen Bahnen) nieder, das er Papst *Paul* III. widmete. Mit Nachdruck wies er darauf hin, daß die Sonne in seinem Weltgebäude die ihr zukommende Stellung, nämlich in der Weltmitte, habe und daß sich unter seinen Annahmen die Bewegung der Planeten viel einfacher darstellen lasse. Obwohl dieses Hauptwerk, außer der Widmung, schon 1532 fertig war, zögerte Koppernick doch mit seiner Veröffentlichung, und es bedurfte erst des Drängens seiner Freunde, bis er das Werk zum Druck freigab. Warum zögerte er solange? Der Grund dürfte darin zu suchen sein, daß er allmählich die Fehler der griechischen Beobachtungen bemerkte und auch seinen eigenen Beobachtungen nicht sehr traute, weshalb er seinem jungen Freund *Joachim Rheticus* gegenüber sich äußerte, er glaube nicht der Wahrheit auf mehr als 10′ nahe zu kommen.

Nun gab es allerdings eine Möglichkeit, die Richtigkeit seiner Lehre nachzuprüfen, indem er auf Grund der von ihm ermittelten Bahngrößen den künftigen Lauf der Planeten vorherberechnete. Eine solche Vorausberechnung, auch Jahrbuch oder Ephemerides genannt, hatte Koppernick gemacht, als sein Freund *Wapowski* ihn im Herbst 1535 besuchte. Dieser nahm sich hocherfreut eine Abschrift mit und sandte sie am 13. Oktober 1535 an *Sigismund von Herberstein* mit der Aufforderung, dieses Jahrbuch den Berechnern von Jahrbüchern in Deutschland zuzusenden oder in Wien drucken zu lassen, damit die europäischen Sternforscher ihre Fehler entdeckten. Wapowskis baldiger Tod verhinderte wohl die Ausführung dieses Planes. Anscheinend ist Koppernicks Jahrbuch nicht verbreitet worden. Damit fiel auch die Nachprüfung von fremder Seite fort. Er selbst dürfte seine Vorausberechnungen benutzt haben, um ihre Richtigkeit an Hand der Beobachtungen zu prüfen. Zu dem Zweck setzte er seine Beobachtungen fort. Welche Schlüsse er daraus gezogen hatte, ist unbekannt.

Der Umstand, daß er ein Jahrbuch berechnet hatte, ist sehr wichtig, beweist er doch, daß Koppernick nicht ein Gedankengebilde, ohne Rücksicht auf die Tatsachen, schaffen wollte. Vielmehr sollte es die Grundlage für die genaue Berechnung der künftigen Himmelserscheinungen bilden. Die Bedürfnisse der beobachtenden Sternforschung und nicht die Vorliebe für irgendwelche philosophische Weltgebäude bestimmten sein Handeln.

Koppernicks Urschrift zu seinem Hauptwerk ist noch vorhanden und läßt erkennen, daß er manche Bemerkung später wegließ, weil sie ihm nicht gesichert zu sein schien. Darin offenbart sich seine vorsichtige, allem Unsicheren abholde Eigenart.

Im Frühjahr 1539 kam der Wittenberger Professor *Georg Joachim Rheticus*, geboren zu Feldkirch, nach Frauenburg, um Koppernick und sein Werk kennenzulernen. Hier erhielt er Einblick in das Werk und veröffentlichte darüber noch im nächsten Winter einen eingehenden Bericht „Narratio Prima de libris revolutionum". Er versuchte Koppernick zur Veröffentlichung des Werkes zu bewegen. Auch der Bischof *Tiedemann Giese* wirkte im gleichen Sinn auf Koppernick ein. Endlich gelang es ihm, dessen Zustimmung zu erhalten, worauf er die Urschrift an Rheticus zum Abdruck sandte. Dieser reiste im Mai 1542 mit der Schrift nach Nürnberg und verhandelte dort mit dem Drucker *Johann Petrejus* wegen des Druckes, der bald begann, so daß Rheticus noch die Korrektur der Einleitung und des 1. Bogens in Nürnberg las. Im Herbst 1542 verließ er Nürnberg und übergab dem dortigen Geistlichen *Andreas Osiander* die Aufsicht über den weiteren Druck, der Anfang 1543 erschien. Während des Druckes war sein Verfasser schwer erkrankt, so daß das Schlimmste zu befürchten war. Am 24. Mai 1543 starb Koppernick an einem Bluterguß und darauffolgenden Schlaganfall, nachdem er schon viele Tage zuvor ohne Bewußtsein verbracht hatte. Wie sein Freund Giese berichtet, kam an seinem Todestag das Buch an, das ihm unsterblichen Ruhm bringen sollte. Er wurde im Dom zu Frauenburg bestattet.

Im Kampf der Meinungen

Koppernick hatte als erster nachgewiesen, daß die Himmelserscheinungen sich besser und übersichtlicher darstellen lassen, wenn die Sonne statt der Erde zum Mittelpunkt der Welt gewählt wird und alle Planetenbewegungen um die Sonne erfolgen. Wie wirkte diese grundlegende Entdeckung auf seine Zeitgenossen? Damals war die allgemeine Aufmerksamkeit auf die Spaltung der christlichen Kirche in die katholische und die evangelische Richtung gerichtet. Die Anhänger der katholischen Kirche wünschten die seit 1000 Jahren bestehenden



Abb. 5. Bildnis Koppernicks

Gebräuche fortzusetzen, während die Evangelischen eine Erneuerung der Kirche, unter Betonung der Heiligen Schrift, erstrebten.

Angesichts dieser sich bekämpfenden Meinung mußte die Wirkung der Koppernickschen Lehre verschieden ausfallen. Obwohl Koppernick

sich kirchlich sehr milde gezeigt hatte, so erfolgte der erste Angriff gegen seine Lehre von der evangelischen Seite. Es geschah 1531 im nahen Elbing, daß ein Schulmeister in einem Fastnachtsspiel Koppernick und seine Lehre verspottete. Dieser Schulmeister stand allerdings nicht allein in seiner Ablehnung dieser neuen Gedanken, hatte sich doch sogar *Luther* erregt über Koppernick ausgesprochen „Der Narr will die ganze Kunst Astronomiae umkehren! Aber wie die heilige Schrift anzeigt, so hieß Josua die Sonne still stehen und nicht das Erdreich!" *Melanchthon* hielt sogar ein polizeiliches Vorgehen gegen die umstürzlerischen Gedanken für nötig; er schrieb im Herbst 1541 „Manche halten es für eine hervorragende Leistung, eine so verrückte Sache zu machen wie dieser preußische Sternforscher, der die Erde bewegt und die Sonne anheftet. Wahrlich, weise Herrscher sollten die Zügellosigkeit der Geister zähmen!" Sicherlich hatte auf seine Veranlassung *Osiander* sich an Koppernick und Rheticus gewandt, um sie zu bewegen, die im Hauptwerk als richtig erwiesene Lehre von der Erdbewegung nur als Annahme zu bezeichnen, um jedes Ärgernis zu vermeiden. Koppernick ging darauf nicht ein; Osiander benutzte aber die Aufsicht über die Drucklegung, um eine Vorrede voranzuschicken, die geeignet war, den Leser über Koppernicks Gedanken irre zu führen; denn darin heißt es: „Allerdings ist es nicht erforderlich, daß die Annahmen wahr seien; sie brauchen nicht einmal wahrscheinlich zu sein. Es genügt, wenn sie die Himmelserscheinungen rechnerisch darstellen lassen." Da Osiander sich darin nicht als Verfasser der Vorrede zu erkennen gab, so mußte der Leser meinen, daß Koppernick selbst diese Vorrede verfaßt oder einen Freund damit beauftragt hatte. Somit wurden die Leser irregeführt. Solche Widerstände erwuchsen diesem Werk von evangelischer Seite her. Nur allmählich erlahmte der Widerstand und wich einer immer größer werdenden Achtung vor dem großen Geisteswerk.

Ganz anders verhielt sich die katholische Kirche zur neuen Lehre. Sogleich nach der Vollendung des Hauptwerkes und lange vor der Drucklegung waren die Grundzüge dieser Lehre schon so verbreitet, daß Papst *Clemens* VII. sich 1533 in Gegenwart mehrerer Kirchenfürsten von *Joh. Albert Widmannstetter* über die Bewegung der Erde berichten ließ; zum Dank schenkte er ihm eine sehr wertvolle griechische Handschrift. Einige Jahre später, am 1. November 1536, schrieb Kardinal *Nikolaus von Schomberg* aus Rom an Koppernick und bat ihn, sein großes Werk nicht den Freunden der Wissenschaft vorzuenthalten, sondern ihm sein Werk in Abschrift zuzusenden. „Wenn Du diese meine Bitte erfüllst, so wirst Du erfahren, daß Du in Verbindung mit einem Dir sehr wohlgesinnten Menschen getreten bist, der nichts sehnlicher wünscht, als Deinen großen Verdiensten Anerkennung zu verschaffen."

Auch die preußischen Kirchenfürsten bemühten sich, Koppernick zur Veröffentlichung seines Werkes zu bewegen. Der ermländische Bischof *Dantiscus* sandte ihm 1541 ein Preislied zum Lobe des Werkes, das im Druck veröffentlicht werden sollte. Und der Kulmer Bischof *Giese* drängte seinen Freund ständig zur Veröffentlichung, besorgte auch die Übersendung des Werkes an Rheticus und war empört über Osianders hinterhältige Vorrede.

Erst allmählich änderte die katholische Kirche ihre günstige Haltung. Bekannt ist Galileis Verurteilung wegen seines Eintretens für die neue Lehre. Der italienische Physiker *Galilei* rühmte sich, in seinem Fernrohr vier um Jupiter kreisende Monde, zwei Monde beim Saturn und den Gestaltenwechsel der Venus und Merkur beobachtet zu haben; dies hielt er für wichtige Beweise für Koppernicks Lehre und veröffentlichte darüber einen Bericht, in der Form eines Briefes an *Christine von Lothringen.* Er hoffte, dadurch die Kirche zur öffentlichen Anerkennung der neuen Lehre zu bewegen; tatsächlich erreichte er das Gegenteil, nämlich die amtliche Erklärung, daß „die dem Koppernick zugeschriebene Lehre der Heiligen Schrift zuwider sei und darum nicht verteidigt oder für wahr gehalten werden dürfe“. Am 3. März 1616 wurden die Bücher Koppernicks und seines Anhängers *Stunica* für schriftwidrig erklärt — nach *Keplers* Meinung: „weil es durch die Schroffheit einiger Leute, welche Fragen der Sternforschung an unrechter Stelle und in unpassender Weise behandeln, dahin gekommen ist, daß das Lesen des Werkes Koppernicks, das fast 80 Jahre ganz unbehelligt blieb, schließlich untersagt wurde, bis das Werk verbessert sei.“ Trotz dem Mißerfolge gab *Galilei* nicht nach; von Zeit zu Zeit veröffentlichte er Schriften, in denen er neue Beweise für die Richtigkeit der neuen Lehre beizubringen versuchte; allerdings war seine Beweisführung nicht glücklich; besonders die durch Keplers Bemühungen erlangten Verbesserungen der Lehre berücksichtigte er nicht. Als er nun in seinem 1632 erschienen Zwiegespräch über das Weltgebäude die bisher herrschende und von der katholischen Kirche anerkannte Lehre des Ptolemaios dem allgemeinen Gelächter preisgab, schritt das geistliche Gericht ein. Er wurde nach Rom befohlen, wo die Verhandlungen gegen ihn im Frühjahr 1633 stattfanden. Im Laufe der Untersuchung, wobei es nicht zur Anwendung, vielleicht auch nicht zur Vorzeigung der Folterwerkzeuge kam, bekannte Galilei sich bald schuldig, die Lehre Koppernicks verteidigt zu haben und mußte schwören „weder mündlich noch schriftlich etwas zu sagen oder zu behaupten, wegen dessen ein ähnlicher Verdacht gegen mich entstehen könne“. Angeblich soll er dabei erklärt haben „und sie bewegt sich doch“; dies ist eine Sage, die erst viel später aufkam. Koppernicks Werk gehörte daraufhin bis zum Jahr 1835 zu den für die Katholiken verbotenen Büchern.

Die wissenschaftliche Erprobung der neuen Lehre

Koppernick trug Bedenken, seine Lehre zu veröffentlichen. Erst bei seinem Lebensende erschien sie und wurde den Gelehrten zugänglich. Gewiß drang die Kunde von der großen Neuerung rasch in die Gelehrtenkreise und der Vorbericht des Rheticus hatte die Aufmerksamkeit auf ihre Besonderheiten gelenkt. Immerhin konnten doch erst die im Hauptwerk enthaltenen Tafeln der Bewegungen der Planeten die Möglichkeit zur Prüfung geben. Die Nachprüfung fiel nicht sehr günstig für die neue Lehre aus, so daß die lange Zurückhaltung der Sternforscher erklärlich ist. Wenn sich auf Grund der neuen Lehre die Himmelserscheinungen viel genauer hätten vorausberechnen lassen, so würden die Bedenken wegen des Verstoßes gegen den Sinnenschein und di Heilige Schrift wohl eher überwunden worden sein; aber so geschah es, daß selbst ein so hervorragender Sternforscher wie *Brahe* die neue Lehre nicht annahm, sondern den Ausweg vorschlug, daß die Stellung der Erde in der Weltmitte beibehalten werde; aber alle Planeten ließ er um die Sonne kreisen, die wiederum die Erde umkreist. Brahe hat sich das große Verdienst erworben, daß er die Bewegung der Planeten sehr sorgfältig beobachtete und damit die Möglichkeit zur Prüfung der neuen Lehre gab. Diese Prüfung führte Kepler durch. Er konnte Koppernicks Lehre im erweiterten Sinn bestätigen. Wichtig wurde seine Entdeckung der nach ihm benannten Grundgesetze der Planetenbewegung, wodurch die wahre Form dieser Bewegung erkannt und die Sonne als der wirkliche Bezugsort aller Planetenbewegungen festgestellt wurde. Als später auch die Widerspiegelung der Erdbewegung in den Örtern und im Lichtwechsel der Sterne gefunden wurde, schwand das letzte Bedenken.

Allerdings dauerte es sehr lange, bis die neue Lehre ins Volk drang. Seit dem 17. Jahrhundert bemühte man sich durch geeignete Geräte, Planetarien genannt, die Himmelserscheinungen gemäß Koppernicks Lehre darzustellen und jedem die Vorteile dieser neuen Betrachtungsweise vor Augen zu führen. Nicht leicht waren die Anhänger der alten Lehre zu überzeugen, wie das Gemälde des holländischen Malers *Troost* ersehen läßt. Noch lange verband man mit dem neuen Weltgebäude die Vorstellung des schwer zu Verstehenden und bezeichnete in Franken sehr Schwieriges und Sonderbares mit „köpperneksch“.

Koppernicks Weltgebäude war der erste Versuch, sich von der griechischen Bevormundung zu befreien. Er entstand aus dem Unbehagen über den Widerspruch zwischen der herrschenden Lehre und der Wirklichkeit. Zuerst war dieser Kampf gegen die herrschende Lehre eine deutsche Angelegenheit — von Heinrich von Hessen über Regiomontan und Koppernick bis Kepler — und allmählich griff diese Geistesbewegung auf die benachbarten Völker über und eroberte sich die Menschheit.

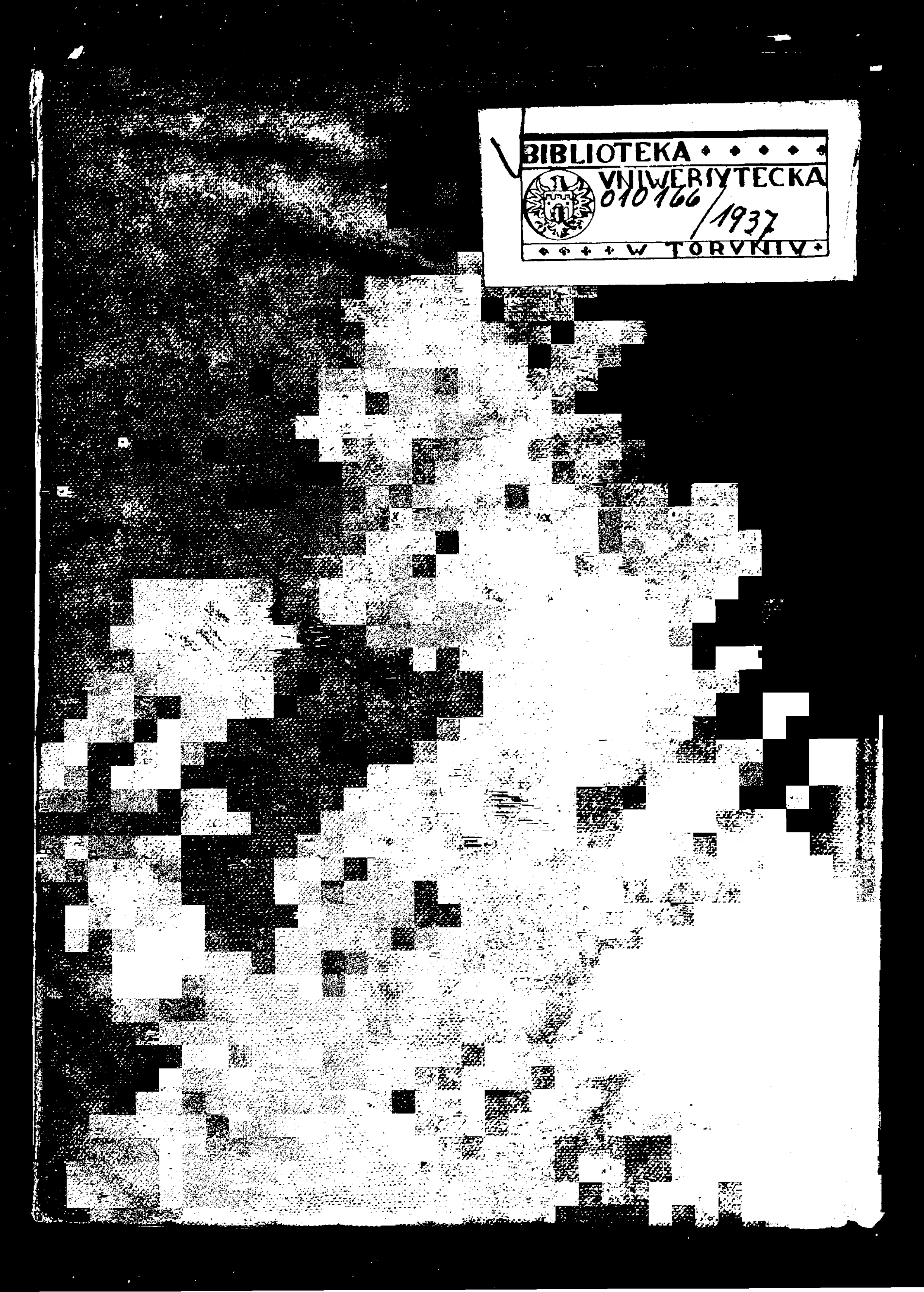


Abb. 6. „Der Streit der Sternkundigen.“ Rechts der Vertreter der alten Lehre weist auf die zu seinen Füßen dargestellte Bewegung der Sonne (Teller mit Knochen) und des Mondes (Teller mit Käse) um die Erde (Weinflasche) als Weltmitte. Dagegen zeigt in der Mitte des Bildes der Vertreter der Lehre Koppernicks auf die neue Bewegungsform, wonach die Sonne (Teller mit Schinken) von der Erde (Weinflasche) mit dem Mond (Teller mit Käse) umkreist wird. (Gemälde des holländischen Malers Troost.)

Bildnisse

Wie sah dieser Bahnbrecher der Wissenschaft aus? Diese Frage läßt sich nicht leicht beantworten. Seine Bildnisse sind wohl zahlreich; aber die verbreitetsten dürften sein Aussehen am wenigsten wiedergeben. Koppernick soll sich selbst abgebildet haben. Dieses Bildnis dürfte der Kupferstich (Abb. 5) sein. Er befindet sich in der früher *Rheticus* gehörigen Urschrift des Hauptwerkes und im Schweinfurter Exemplar des Hauptwerkes, das früher *Praetorius* gehörte, der 1570 in Krakau mit Rheticus verkehrte; von ihm dürfte er den Stich erhalten haben, der das älteste Bildnis Koppernicks darstellt. Außerdem gab es ein Bildnis, das als Vorlage für das Gemälde in der Johanneskirche zu Thorn und für das Gemälde im Gymnasium zu Thorn diente. Ein ähnliches Gemälde diente als Vorlage für das um 1574 geschaffene Gemälde an der Straßburger Münsteruhr. Dieses durch Übermalung entstellte Gemälde zeigt Koppernick mit dem Maiglöckchen in der Hand und diente als Vorlage für viele Stiche und Holzschnitte. Sehr verbreitet wurde auch ein anderes Bildnis, das Koppernick in langem Mantel und mit einem Planetarium in der Hand zeigt, d. h. mit einem Gerät zur Darstellung der Bewegung von Erde und Mond um die Sonne. Dieses Bildnis ist allerdings erst 1632 entstanden und verdient wenig Vertrauen; dasselbe ist der Fall mit offenbar jüngeren Bildnissen, die dem *Ghirlandajo* oder dem *Basaiti* zugeschrieben werden. Ein dem *Ribera* zugeschriebenes Gemälde kommt als Koppernick-Bildnis ebenfalls nicht in Betracht. Auch gibt es mehrere Fälschungen. Bemerkenswert ist ein früher in Gotha befindliches und später in polnischen Besitz gekommenes Gemälde, das Koppernick als älteren Mann zeigt. In Deutschland befindet sich außer dem Stich ein Gemälde in der Universitätsbibliothek zu Leipzig (Titelbild dieses Heftes), wohl eine Nachahmung des Gemäldes in der Johanneskirche zu Thorn. Kürzlich gelang der Nationalgalerie in Berlin die Erwerbung eines Gemäldes von 1593. Es hing früher in der Weinstube der Weingroßhandlung Joh. Michel Schwarz zu Thorn. Demnach ist es sehr wahrscheinlich, daß es sich hier um das Gemälde handelt, das 1598 zu den Büchern Koppernicks in Frauenburg gehörte. Gewiß wurde das Gemälde erst 50 Jahre nach seinem Tod hergestellt; es ist jedoch wahrscheinlich, daß es eine alte Vorlage wiedergibt. Koppernick ist darauf als älterer Mann dargestellt, etwa der Zeit entsprechend, als er an seinem Hauptwerk arbeitete.




BIBLIOTEKA
VNIWERSYTECKA
010166 / 1937
W TORVNIV